

KW21 Kraftwerke des 21. Jahrhunderts

Abschlussbericht Phase II, 2009-2012

Band 1

KW21 ist eine Forschungsinitiative des Landes Baden-Württemberg und des Freistaats Bayern





Abschlussbericht Forschungsinitiative Kraftwerke des 21. Jahrhunderts (KW21)

01.01.2009 bis 31.12.2012



Band 1

Öffentliche Förderung:

- > Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg
- > Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst
- > Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie



Vorwort

Die Forschungsinitiative KW21 "Kraftwerke des 21. Jahrhunderts" geht nun nach acht Jahren der fruchtbaren Zusammenarbeit zu Ende. Mit diesem Abschlussbericht der zweiten Phase werden die vielfältigen Ergebnisse und Erfolge der letzten vier Jahre eindrücklich dokumentiert. In der zweiten Förderperiode haben 23 Forschergruppen aus Bayern und Baden-Württemberg zusammen mit 11 Industriepartnern insgesamt 34 Forschungsprojekte durchgeführt.

Möglich gemacht wurde KW21 durch die großzügige und langjährige Unterstützung durch das Land Baden-Württemberg und den Freistaat Bayern. In Baden-Württemberg wurde KW21 von dem Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst mit Mitteln aus der Zukunftsoffensive III gefördert. In Bayern haben die Bayerischen Staatsministerien für Wissenschaft, Forschung und Kunst sowie für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technik die Initiative mit Mitteln aus dem Klimaprogramm 2020 unterstützt.

Insbesondere möchten wir auch den Industriepartnern an dieser Stelle für ihr finanzielles Engagement und die gute fachliche Betreuung der Arbeitskreise danken. Diese sind:

- ALSTOM Power GmbH
- Clariant Produkte (Deutschland) GmbH
- EnBW Erneuerbare und Konventionelle Erzeugung AG
- E.ON Energie AG
- Esytech Energy- und Systemtechnik GmbH
- MAN Diesel & Turbo AG
- Martin GmbH für Umwelt- und Energietechnik
- MTU Aero Engines GmbH
- Siemens AG
- UTP Schweißmaterial GmbH
- Voith Hydro Holding GmbH & Co. KG

Vorwort



An dieser Stelle wollen wir uns aber auch bei den Mitgliedern des Lenkungsausschusses bedanken, die die Forschungsinitiative teilweise die gesamten acht Jahre plus die Vorbereitungszeit des ersten Antrages mit Rat und Tat unterstützt haben. Hervorzuheben sind hier besonders die Sprecher der Arbeitskreise, welche den "Alltag" in KW21 gestaltet haben.

Schließlich bedanken wir uns ganz herzlich bei den Gutachtern, von denen uns ebenfalls die meisten die gesamten acht Jahre begleitet und in sechs Begutachtungen unermüdlich wertvolle Hinweise für die erfolgreiche Zusammenarbeit in KW21 gegeben haben.

Im Oktober 2013

Sattelmayor

Prof. Dr.-Ing. Thomas Sattelmayer Bayerischer Sprecher KW21 TU München, Lehrstuhl für Thermodynamik

lapa 1

Prof. Dr.-Ing. Manfred Aigner Baden-Württembergischer Sprecher KW21 DLR Stuttgart, Institut für Verbrennungstechnik



Partner im Verbund

Akademische Partner:

- Bayern Innovativ Gesellschaft für Innovation und Wissenstransfer mbH
- BayFOR Bayerische Forschungsallianz GmbH
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) Institut für Verbrennungstechnik Prof. Dr.-Ing. Manfred Aigner
- Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Mauch Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner
- Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
 - Engler-Bunte-Institut, Bereich Verbrennungstechnik (EBI-VBT) Prof. Dr.-Ing. Nikolaos Zarzalis
 - Institut f
 ür Thermische Str
 ömungsmaschinen (IST) Prof. Dr.-Ing. Hans-J
 örg Bauer Dr.-Ing. Klaus Dullenkopf
- Technische Universität München
 - Lehrstuhl f
 ür Energiesysteme Prof. Dr.-Ing. Hartmut Spliethoff
 - Lehrstuhl f
 ür Energiewirtschaft- und Anwendungstechnik Prof. Dr.-Ing. Thomas Hamacher Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner
 - Lehrstuhl f
 ür Flugantriebe Prof. Dr.-Ing. Peter Kau († 2013) Dr.-Ing. Andreas Hupfer
 - Lehrstuhl für Fluidmechanik
 Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Rudolf Schilling
 - Lehrstuhl f
 ür Thermodynamik Prof. Dr.-Ing. Thomas Sattelmayer Prof. Wolfgang Polifke, Ph.D.

Universität Bayreuth

 Lehrstuhl Metallische Werkstoffe (MW) und Lehrstuhl Keramische Werkstoffe(CME) Prof. Dr.-Ing. Uwe Glatzel Dr. rer. nat. Günter Motz

Universität Erlangen-Nürnberg

- Lehrstuhl für Technische Thermodynamik Prof. Dr.-Ing. Alfred Leipertz Prof. Dr.-Ing. Thomas Seeger
- Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Technologie der Metalle Prof. Dr.-Ing. Robert F. Singer



Universität Stuttgart

- Institut für Energiewirtschaft und rationelle Energieanwendung (IER) Prof. Dr.-Ing. Alfred Voß
- Institut f
 ür Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) Prof. Dr. techn. G
 ünter Scheffknecht Prof. PD Dr.-Ing. Uwe Schnell
- Institut für Luftfahrtantriebe (ILA) Prof. Dr.-Ing. Stephan Staudacher
- Institut f
 ür Thermische Str
 ömungsmaschinen und Maschinenlaboratorium (ITSM) Prof. Dr.-Ing. Michael Casey Dr.-Ing. J
 ürgen F. Mayer
- Institut für Thermodynamik der Luft- und Raumfahrt (ITLR) Prof. Dr.-Ing. Jens von Wolfersdorf
- Staatliche Materialprüfungsanstalt (MPA) Prof. Dr.-Ing. Eberhard Roos Prof. Dr.-Ing. Karl Maile

Die akademischen Partner waren für die wissenschaftliche Bearbeitung der Teilprojekte in Absprache mit den Industriepartnern verantwortlich. Die jeweiligen Projektbearbeiter sind in den Berichten zu den Teilprojekten genannt.

Partner aus der Industrie:

- ALSTOM Power GmbH
- Clariant Produkte (Deutschland) GmbH
- E.ON Energie AG
- EnBW Erneuerbare und Konventionelle Erzeugung AG
- · Esytech Energy- und Systemtechnik GmbH
- MAN Diesel & Turbo AG
- Martin GmbH für Umwelt- und Energietechnik
- MTU Aero Engines GmbH
- Siemens AG
- UTP Schweißmaterial GmbH
- Voith Hydro Holding GmbH & Co. KG

Die Partner aus der Industrie hatten die Aufgabe darauf hinzuwirken, dass bei den Teilprojekten die Belange der Praxis hinreichend Berücksichtigung fanden. Die jeweils am Projekt beteiligten Industrieunternehmen sind in den Berichten zu den Teilprojekten genannt.



Organisation:

- Sprecher KW21 Baden-Württemberg
 Prof. Dr.-Ing. Manfred Aigner, DLR Stuttgart
- Sprecher KW21 Bayern
 Prof. Dr.-Ing. Thomas Sattelmayer, TU München
- Koordination KW21 Baden-Württemberg Dipl.-Kfm. Philipp von Ritter zu Groenesteyn, DLR Stuttgart
- Koordination KW21 Bayern
 Dipl.-Ing. Sigrid Natalie Schulz-Reichwald, TU München
- Sprecher des Arbeitskreises Energiewirtschaft (E) Dr. Wolfgang Woyke (bis 07/2010), E.ON Energie AG, München Dipl.-Ing. Kerstin Schwalm (ab 07/2010), E.ON Energie AG, München Owe Jönsson (ab 11/2011), E.ON SE, Düsseldorf
- Sprecher des Arbeitskreises Kraftwerkssysteme und Dampferzeuger (DE) Dr.-Ing. Martin Käß, Erneuerbare und Konventionelle Erzeugung AG, Stuttgart
- Sprecher des Arbeitskreises Fluiddynamik und Dampfturbine (DT) Dr.-Ing. Dirk Goldschmidt, Siemens AG, Mülheim an der Ruhr
- Sprecher des Arbeitskreises Turbokomponenten für Gasturbinen (GT) Dipl.-Ing. Heinz Knittel, MTU Aero Engines GmbH, München
- Sprecher des Arbeitskreises Brennkammern für Gasturbinen (GV) Dipl.-Ing. Armin Schimkat, ALSTOM Power GmbH, Mannheim

Die beiden Sprecher vertraten KW21 gleichberechtigt in der Öffentlichkeit, die Koordinatoren verantworteten die Umsetzung der im Lenkungsausschuss getroffenen Beschlüsse und sorgten für die administrative Steuerung des Verbundes im jeweiligen Bundesland. Die fünf Arbeitskreissprecher kümmerten sich um die wissenschaftliche Begleitung der Teilprojekte ihrer jeweiligen Arbeitskreise und vertraten diese im Lenkungsausschuss.

Fördermittelgeber:

- Ministerium f
 ür Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-W
 ürttemberg, vertreten durch MRin Susanne Ahmed, Dr.-Ing. Julia Kaazke (ab 06/2012)
- Bayerisches Staatsministerium f
 ür Wissenschaft, Forschung und Kunst, vertreten durch MRin Birgit Schmid, RRin Helene Schultzky (bis 2011)
- Bayerisches Staatsministerium f
 ür Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie, vertreten durch MR Dr.-Ing. Josef Schadl



Lenkungsausschuss:

Der Lenkungsausschuss bestand aus Vertretern der Fördermittelgeber, den KW21-Sprechern und -Koordinatoren sowie den Sprechern der fünf Arbeitskreise. Der Lenkungsausschuss traf sich i.d.R. im halbjährlichen Turnus abwechselnd in München und Stuttgart, in notwendigen Fällen auch öfters. Im Lenkungsausschuss wurden im Konsensverfahren Beschlüsse zur Steuerung des Gesamtverbundes (z.B. Ausrichtung von Workshops, Vorbereitung von Begutachtungen, Berichtspflicht etc.) getroffen.

Gutachtergremium:

- Prof. Dr. Reza S. Abhari, Ph.D., Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
- Prof. Dr. rer. pol. Wolf Fichtner, Karlsruher Institut für Technologie
- Univ.-Prof. Dr.-Ing. Franz Heitmeir, Technische Universität Graz
- Univ.-Prof. Dr.-Ing. Franz Joos, Helmut-Schmidt-Universität Hamburg
- Univ.-Prof. Dr.-Ing. Reinhold Kneer, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
- · Prof. Dr. techn. Reinhard Leithner, Universität Braunschweig
- Prof. Dr. Jim J. McGuirk, Loughborough University
- Univ.-Prof. Dr. Viktor Scherer, Ruhr-Universität Bochum
- Prof. Dr. Lorenz Singheiser, Forschungszentrum Jülich GmbH
- Univ.- Prof. Dr.-Ing. Hermann-Josef Wagner, Ruhr-Universität Bochum
- Prof. Dr. Alexander Wokaun, Paul Scherrer Institut Villingen



Inhaltsverzeichnis Band 1

1	Ziel	setzur	ng	11
2	Zus	amme	narbeit in den Arbeitskreisen	12
	2.1	Aktivit	äten der Arbeitskreise	12
	2.2	Fakter	n zum Verbund	16
	2.3	KW21	-Workshops	16
		2.3.1	Erster Workshop (Kick-off)	16
		2.3.2	Zweiter Workshop	18
		2.3.3	Dritter Workshop	19
3	Öffentlichkeitsarbeit			20
	3.1	Inform	nationsmaterial	20
		3.1.1	Infoblatt	20
		3.1.2	Displaywand	21
	~ ~	3.1.3	Flyer, Projektkarten und Infomappe	21
	3.2	Intern		23
		3.2.1	Externe Homepage	23 23
	3.3	Veran	staltungen	24
		3.3.1	Kongress für Energieeffizienz, Nürnberg	24
		3.3.2	Hannover Messe 2010	25
		3.3.3	VGB-Konferenz "Kraftwerke im Wettbewerb 2011" mit	07
		334	Hannover Messe 2012	27
		3.3.5	Abschlusssymposium, Stuttgart	27
		3.3.6	Kongress "Gesellschaft im Wandel – Forschung im Wandel",	
		0 0 7	München	29
	2.4	3.3.7 Dress		29
	3.4	Press	espiegei	30
4	Übe	rblick	der Ergebnisse aus den Arbeitskreisen und	
	den	Einze	Iprojekten	32
	4.1	4.1 E: Energiewirtschaft		32
	4.2	2 DE: Kraftwerkssysteme und Dampferzeuger		35
	4.3	DT: FI	uiddynamik und Dampfturbine	39
	4.4	GT: Tu	urbokomponenten für Gasturbinen	43
	4.5	GV: B	rennkammern für Gasturbinen	46



5	5 E: Energiewirtschaft		51
	5.1	BY 1E: Integration und Bewertung erzeuger- und verbraucherseitiger Energiespeicher	52
	5.2	BY 2E: Einsatzmöglichkeiten von Elektrostraßenfahrzeugen zum Lastmanagement	72
	5.3	BY 3E: Simulationsgestützte Prognose des elektrischen Lastverhaltens bis 2030	85
	5.4	BW L 21E: Modell zur Portfolioauswahl in der Elektrizitätswirtschaft	99
	5.5	BW W 21E: Investitionsentscheidungen zur optimalen Risikodiversifikation von Kraftwerksbetreibern	122
	5.6	BW L 22E: Entwicklung eines Modellansatzes zur integrierten Analyse von Erdgasbereitstellung, Erdgastransport und Erdgasverbrauch in Europa	140
	5.7	BW W 22E: Perspektiven der Stromerzeugung aus Erdgas im Rahmen der europäischen Erdgasversorgung	152
6	DE:	Kraftwerksysteme und Dampferzeuger	167
	6.1	BY 4DE: Reduktion von Verschlackungstendenzen	168
	6.2	BY 5DE: Modellierung des dynamischen Verhaltens von 700°C-Kraftwerken	190
	6.3	BY 6DE: Effiziente Energieerzeugung aus Abfall	211
	6.4	BY 7DE: Nanokeramische Funktionsschichten auf Precursorbasis als Korrosionsschutz für Müll- und Biomasseverbrennungsanlagen	234
	6.5	BW L 25DE: Untersuchung der flammlosen Oxidation für Kohlen- staubverbrennung	255
	6.6	BW W 25DE: Erprobung Kohle-FLOX®-Brenner im halbtechnischen Maßstab	266
	6.7	BW L 26DE: Untersuchung von Mineralumwandlungsvorgängen zur Verschlackungsreduktion	278
	6.8	BW W 26DE: Reduktion von Verschlackungstendenzen an den Strahlungsheizflächen moderner Kraftwerke	295
	6.9	BW L 27DE: Innovative Brennertechnologien und Feuerungskonzepte für Oxyfuel-Kraftwerke	315
	6.10	BW W 27DE: Innovative Brennertechnologien und Feuerungskonzepte für Oxyfuel-Kraftwerke	332
	6.11	BW L 29DE: Untersuchung von Schweißverbindungen an Nickellegierungen	349
	6.12	BW W 29DE: Optimierung von Schweißverbindungen an Nickellegierungen	366
7	DT:	Fluiddynamik und Dampfturbine	383
	7.1	BY 8DT: Einfluss von Druckschwankungen auf die Dauerfestigkeit von Francis Turbinen	384
	7.2	BY 9DT: Rotordynamische Eigenschaften von Bürstendichtungen	400
	7.3	BW L 31DT: Anisotherm beanspruchte Mischverbindungen	421
	7.4	BW W 31DT: Anisotherm beanspruchte Schweißverbindungen für Turbomaschinen	439
	7.5	BW L 32DT: Tropfengrößeneinfluss auf Erosionsvorgänge	456



Inhaltsverzeichnis Band 2

	7.6	BW W 32DT: Charakterisierung von Erosionsvorgängen	475
	7.7	BW L 33DT: Innovatives Diffusordesign	492
	7.8	BW W 33DT: Diffusoren für Retrofit-Einsatz	510
	7.9	BW L 34DT: Tropfenpopulation in Niederdruck-Dampfturbinen	530
	7.10	BW W 34DT: Nassdampfströmung in Niederdruck-Dampfturbinen	549
8	GT:	Turbokomponenten für Gasturbinen	567
	8.1	BY 10GT: Untersuchungen zum Einfluss der Dünnwandigkeit auf die mechanischen Hochtemperatureigenschaften verschiedener Nickelbasis- Superlegierungen	568
	8.2	BY 11GT: Erhöhung von Effizienz und Sicherheit von Gasturbinen durch besser gießbare Werkstoffe	584
	8.3	BY 12GT: Bauweisenoptimierung moderner Turbokomponenten	603
	8.4	BW L 36GT: Optimierung von Axialdiffusoren in Gasturbinen für GuD-Anlagen	624
	8.5	BW W 36GT: Experimentelle Untersuchung von Gasturbinen-Axialdiffusoren	640
	8.6	BW L 37GT: Prognose des Leistungsverhaltens von Gasturbinen auf Basis einer selbstadaptierenden Alterungsmodellierung	655
	8.7	BW W 37GT: Verifizierung eines selbst adaptierenden Verfahrens zur Prognose des Leistungsverhaltens von Gasturbinen	668
	8.8	BW L 39GT: Inverse Mess- und Analysemethodiken	680
	8.9	BW W 39GT: Transiente Wärmeübergangsmessungen bei Gasturbinenschaufeln	698
	8.10	BW L 41GT: Formoptimierung neuartiger, kompakter Labyrinthdichtungen zur Leckagereduktion in Turbomaschinen	715
	8.11	BW W 41GT: Experimentelle Untersuchung neuartiger, kompakter Labyrinthdichtungen zur Leckagereduktion in Turbomaschinen	735
9	GV:	Brennkammern für Gasturbinen	749
	9.1	BY 13GV: Hochfrequente Instabilitäten der Verbrennung mit Selbstzündung	750
	9.2	BY 14GV: Flammendynamik bei der Verbrennung von Flüssigbrennstoffen	770
	9.3	BY 15GV: Einfluss neuer, brennstoffflexibler Vormischbrenner auf die thermoakustischen Eigenschaften von Ringbrennkammern	792
	9.4	BY 16GV: Transversalmoden und hochfrequente Instabilitäten in Gasturbinen-Brennkammern	811
	9.5	BY 17GV: Emissionsverminderung bei der Effizienz- und Leistungserhöhung von Gasturbinen	826
	9.6	BY 18GV: Brennstoffflexibles Gasanalysekonzept	846
	9.7	BW L 43GV: Hybrid LES/RANS-Simulation von Gasturbinen-Brennkammer- systemen	860
	9.8	BW W 43GV: Instationäre numerische Simulation von Industriegasturbinen- Brennkammern	874



Inhaltsverzeichnis

Α	Anh	ang mit Adressen der beteiligten Projektpartner	925
	9.10	BW W 44GV: Experimentelle Untersuchung eines "High Strain Brenners" unter Hochdruckbedingungen	907
	9.9	BW L 44GV: Theoretische Erfassung der Abhebehöhe von Strahlflammen bei Druckverbrennung	886



1 Zielsetzung

Bei der Gründung der KW21-Forschungsinitiative war bereits klar, dass die Energieversorgung und speziell die Bereitstellung von Elektrizität in Deutschland vor einem großen Wandel stand. Dies betraf das Land Baden-Württemberg und den Freistaat Bayern in besonderem Maße, weil hier der Kernenergieanteil an der Stromproduktion mit ca. 60 % weit über dem nationalen Durchschnitt lag. KW21 wurde unter anderem gestartet, um diesen Wandel vorzubereiten und zu begleiten. Die erst kürzlich verkündete "Energiewende" hat diesen Prozess bestärkt und massiv beschleunigt.

Über das Ende von KW21 hinaus sind die beteiligten Forschungsstellen durch die während den acht Jahren gewonnenen Erfahrungen wissenschaftlich deutlich gestärkt worden. Da die in KW21 bearbeiteten Themenbereiche derzeit aktueller denn je sind, hat KW21 damit deutlich zum aktuellen und zukünftigen Erfolg der Forschungsstellen als Partner in anderen Forschungsprogrammen und bilateralen Kooperationen mit der Wirtschaft beigetragen.

Die spezifischen Ziele von KW21 waren

- der Ausbau der bereits in vielfältiger Weise bestehenden Forschungskompetenz und Infrastruktur auf dem Gebiet der Kraftwerkstechnik
- der Aufbau eines entsprechenden Netzwerkes mit Industrie, Universitäten und Forschungsstellen
- die Lösung aktueller Fragestellungen aus dem Bereich der Planung, der Entwicklung und des Betriebs von Kraftwerken
- die Bereitstellung der Grundlagen und Werkzeuge, mit denen die beteiligte Industrie den Strombedarf und -produktion als auch die technischen Komponenten im Hinblick auf die sich ändernden Randbedingungen optimieren können bezüglich
 - höchster Effizienz,
 - · großer Flexibilität bei Laständerungen und eingesetztem Brennstoff,
 - geringster Schadstoffemissionen und dennoch
 - zuverlässigem und wirtschaftlichem Betrieb.

KW21 hat somit das nationale COORETEC Programm ergänzt, welches sich auf die CO₂-Reduktionstechnologien und damit weniger auf die aktuellen sondern mehr auf die zukünftigen Technologien konzentriert.

Dem regionalen Charakter wurde insbesondere auch durch den starken Fokus auf die Ausbildung von Studenten und Doktoranden Rechnung getragen. Die beteiligte, in den Ländern ansässige Industrie hat dazu die aktuellen technischen Fragestellungen und Bedürfnisse sowohl durch die Themenstellungen als auch den regen Informationsaustausch in den Einzelprojekten, Arbeitskreisen und jährlichen Workshops und Symposien beigetragen.

Hier hat sich das Modell der Public-Private-Partnership in Bayern und in Baden-Württemberg mit den sowohl öffentlich als auch industriell geförderten Projekten sehr bewährt. Alle Beteiligten haben mit der Finanzierung Verantwortung übernommen und sich entsprechend engagiert.



2 Zusammenarbeit in den Arbeitskreisen

2.1 Aktivitäten der Arbeitskreise

Die Forschungsinitiative war in fünf Arbeitskreise unterteilt, die folgendermaßen strukturiert sind:



Jeder einzelne Arbeitskreis hat einen Arbeitskreisleiter aus der Industrie, um den Anwendungsbezug der Forschung sicher zu stellen. Im Folgenden sind die Arbeitskreise und deren Arbeitskreisleiter aufgeführt:

Energiewirtschaft (E)

Owe Jönsson, E.ON SE, Düsseldorf

Seit dem Kick-Off der KW21 Phase II am 14.-15.05.2009 fanden vier Treffen des AK Energiewirtschaft statt: Januar 2010, Januar 2011, September 2011 und März 2012. Bis November 2011 wurde der Arbeitskreis von Kerstin Schwalm, E.ON Energie AG, betreut. Ab November 2011 übernahm Herr Owe Jönsson, E.ON SE, die Verantwortung.

Inhalt der Arbeitskreissitzungen war der Informationsaustausch und die Diskussion zu den Zielen, der Methodik sowie dem Abstimmungsbedarf im AK und der Bericht der Zwischenergebnisse aus den Teilprojekten. Die Modellansätze für die unterschiedlichen Projekte sind bei den Sitzungen weiterentwickelt und die Ergebnisse bewertet worden.

In den Arbeitskreissitzungen hat auch ein Austausch von Zwischenergebnissen in den verschiedenen Teilprojekten stattgefunden. Die Voraussetzungen für das Gesamtprojekt wurden ebenfalls diskutiert.

Bei den Arbeitskreissitzungen wurden des Weiteren Zwischenworkshops vorbereitet und Einzelprojekte aus dem Arbeitskreis bei mehreren KW21-Workshops dargestellt.



Kraftwerkssysteme und Dampferzeuger (DE)

Dr. Martin Käß, EnBW Erneuerbare und Konventionelle Erzeugung AG, Stuttgart

Neben den zahlreichen individuellen Kontakten zwischen den Vertretern der Hochschulinstitute und den Projektbetreuern in der Industrie wurden gemeinsame Arbeitskreistreffen mit Teilnehmern aller beteiligten Institute und Firmen organisiert. Dabei konnten zu ausgewählten Themenstellungen auch vertiefte Diskussionen zwischen den Projektgruppen der Forschungsinstitute organisiert werden. Von besonderem Interesse waren dabei ein projektübergreifender Austausch zu den Themen Verschlackung und Korrosion. Insbesondere im Rahmen der Modellansätze und Werkstoffdaten für die CFD-Simulationen wurden intensive Diskussionen geführt und Erfahrungen ausgetauscht. Beim Informationsaustausch innerhalb des Arbeitskreises wurde auch besonderes Augenmerk auf Abstimmungen und Synergien der beiden "länderübergreifenden" Projekte zu den Themenkomplexen Verschlackung bei Kohlekraftwerken sowie Feuerungskonzepte für Oxyfuel-Kraftwerke gelegt.

Am 25.02.2010 fand das erste Arbeitskreistreffen am Institut für Metallische Werkstoffe in Bayreuth statt, am 18.11.2010 an der Materialprüfungsanstalt und am Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik in Stuttgart. Ein weiteres Treffen fand am 16.11.2011 am Lehrstuhl für Energiesysteme in München statt. Alle Termine waren mit ca. 20 Teilnehmern gut besucht.

Die Arbeitskreistreffen wurden auch genutzt, um die aktuellen und zukünftigen Herausforderungen für die konventionellen Kraftwerke und den damit verbundenen Forschungsbedarf zu diskutieren. Diese Herausforderungen entstehen durch den geforderten flexibleren Einsatz der Kraftwerke aufgrund der zunehmenden Einspeisung von erneuerbaren Energien in das Stromnetz. Weitere Herausforderungen entstehen durch Veränderungen bei der Versorgung durch Importkohle vom Weltmarkt mit der Folge großer Unterschiede und laufender Schwankungen in der Kohlequalität.

Fluiddynamik und Dampfturbinen (DT)

Dr. Dirk Goldschmidt, Siemens AG, Mülheim an der Ruhr

Das globale Ziel dieses Arbeitskreises war die Verminderung der strömungsmechanischen Verluste in Turbomaschinen und die Erhöhung der Dampfparameter. Verlustbehaftet ist insbesondere der Niederdruckteil von Dampfturbinen mit seinem Abdampftrakt. Hierzu, sowie zur Beschreibung der Erosion von Endstufenschaufeln, wurden in Baden-Württemberg sechs eng verzahnte Projekte durchgeführt. Da die Strömung in diesem Bereich der Dampfturbine besonders komplex ist, besteht dort ein besonders hohes Verbesserungspotential. Auch die beiden bayerischen Vorhaben widmeten sich der Verminderung der aerodynamischen Verluste von Turbomaschinen. Die beiden beteiligten Forschungsstellen untersuchten das Verhalten innovativer Dichtelemente in Dampfturbinen sowie die Frage, wodurch Druckpulsationen in Francis Turbinen entstehen und in wieweit sie vermieden werden können. Darüber hinaus wurde in zwei weiteren baden-württembergischen Projekten das Temperaturverhalten von Bauteilen mit artungleichen Schweißverbindungen untersucht. Dies zielt auf die Erhöhung der Dampfparameter und damit letztendlich die Verbesserung des Wirkungsgrades von Dampfturbinen.



Zusammenarbeit in den Arbeitskreisen

Neben den ständigen direkten Kontakten zwischen den Bearbeitern an den Universitäten und den jeweiligen Teilprojektbetreuern in der Industrie fand im Februar 2010 bei der Siemens AG in Erlangen ein Arbeitstreffen des gesamten Arbeitskreises statt. Das Treffen war gut besucht und es kam zu einem regen Gedankenaustausch.

Darüber hinaus wurden die Aktivitäten des Arbeitskreises auf den KW21-Workshops in Ingolstadt (Mai 2009), in Karlsruhe (September 2010), in Garching (Oktober 2011) und in Stuttgart (September 2012) dargestellt.

Anläßlich der Hannover Messe 2010 wurden die Projektaktivitäten in Form von Projektkarten für die interessierte Öffentlichkeit aufbereitet.

Turbokomponenten für Gasturbinen (GT)

Heinz Knittel, MTU Aero Engines, München

Im Fokus der thematischen Ausrichtung der KW21-Projekte im Themenbereich "Turbokomponenten für Gasturbinen" stehen:

- Wirkungsgradsteigerung (Reduzierung Spaltverluste, Erhöhung Kühleffizienz, optimierte Hochtemperaturwerkstoffe, innovative Diffusorgeometrien)
- Steigerung der Betriebssicherheit (Leistungsprognose).

Zur Bearbeitung dieser Aufgabenstellungen fanden regelmäßig persönliche Treffen, Telefonkontakte und Schriftwechsel in und zu den einzelnen Projekten statt. Darüber hinaus wurde auch ein Arbeitskreis "Turbokomponenten für Gasturbinen" mit Vertretern der beteiligten Forschungsinstitute und Industriepartnern etabliert.

Im Rahmen dieser Arbeitskreissitzungen sollte auch der interdisziplinäre Austausch in den beteiligten Fachdisziplinen gefördert werden. Neben der Vorstellung des

Bearbeitungsstandes in den einzelnen Teilprojekten und deren Diskussion war jeweils auch eine vertiefende Vorstellung über die Forschungsaktivitäten in dem gastgebenden Institut mit Laborbesichtigung eingeplant.

Eine erste Sitzung fand am 27.01.2010 am Lehrstuhl für Werkstoffe und Technologie der Uni Erlangen statt. Am 02.03.2011 fand die zweite Arbeitskreissitzung Sitzung am Lehrstuhl für Luftfahrtantriebe der TU München statt. Die dritte Arbeitskreissitzung wurde am 13.12.2011 am Institut für Thermische Strömungsmaschinen an der Universität Stuttgart durchgeführt. Zur Koordination der Berichtserstattung für die Abschlussbegutachtung fand, im Nachgang zum KW21-Abschlusssymposium, am 06.11.2012 die vierte Arbeitskreissitzung bei MTU Aero Engines in München statt.

Im Rahmen des KW21-Workshops im September 2010 in Karlsruhe konnten im wissenschaftlichen Diskurs auch die direkten Wechselwirkungen zwischen Turbokomponenten und Brennkammer (innerhalb des Systems Gasturbine) diskutiert werden. Den Möglichkeiten zur alterungsabhängigen Leistungsprognose bei Gasturbinen im Betrieb konnten Fragestellungen zur Versorgungssicherheit im Bereich Energiewirtschaft gegenübergestellt werden.



Brennkammern für Gasturbinen (GV)

Armin Schimkat, ALSTOM Power GmbH, Mannheim

Der Arbeitskreis "Brennkammern für Gasturbinen" hat sich seit dem Start der ersten Projekte im Jahr 2009 über persönliche Treffen, Telefonkontakte und Schriftwechsel zu den einzelnen Projekten ausgetauscht. Dabei spielten insbesondere die geplante Vorgehensweise, der Status der Arbeiten, die Bewertung vorliegender Ergebnisse und das Herausarbeiten von Synergien innerhalb der Themenschwerpunkte eine Rolle. Die beiden Themenblöcke:

- · Wirkungsgradsteigerung / Brennstoffflexibilität / Emissionsminderung
- · Verbrennungssimulation / Thermoakustik / Flammenstabilität

wurden basierend auf einer Darstellung der Einzelprojekte u.a. für die KW21-Workshops in Karlsruhe in 2010 sowie München in 2011, das Abschlusssymposium in Stuttgart in 2012 und gegenüber der fachlich interessierten Öffentlichkeit in Form von Projektkarten aufbereitet.

Am 14. Dezember 2009 fand bei ALSTOM Power GmbH in Mannheim zur Verbesserung des Austauschs zwischen den Projektpartnern unter Beteiligung von Industrievertretern ein erster gemeinsamer Workshop auf Arbeitskreisebene statt. Der Workshop war mit 20 Teilnehmern gut besucht und führte zu fruchtbaren Diskussionen.

Weitere Arbeitskreistreffen folgten am 23. Februar 2011 am Lehrstuhl für Thermodynamik der TU München und am 28. Februar 2012 am Engler-Bunte-Institut des KIT, um den Beteiligten wechselseitig ein Kennenlernen der einzelnen Forschungseinrichtungen zu ermöglichen.



2.2 Fakten zum Verbund

Die Forschungsinitiative KW21 leistete einen bedeutsamen Beitrag zur Ausbildung von Nachwuchswissenschaftlern und bei der Veröffentlichung neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse, wie die folgende Zusammenfassung zeigt:

	Baden- Württemberg (BW)	Bayern (BY)	BW und BY
Studentische Mitarbeiter	60	61	121
Studien-, Semester-, Bachelorarbeiten	95	97	192
Diplom- und Masterarbeiten	26	51	77
Promotionen	17	24	41
Veröffentlichungen	123	127	250
Begutachtungen			2
Workshops			4
Messeauftritte			2
Sonstige Ausstellungen			5

2.3 KW21-Workshops

Wie auch in der ersten Phase von KW21 haben sich die gemeinsamen Workshops als äußerst effiziente Form der Zusammenarbeit erwiesen. Die dort gezeigten Präsentationen wurden zum größten Teil auf der internen Homepage aufgeführt und ließen sich bequem herunterladen. Bei den Workshops hatten die Projektbeteiligten Gelegenheit ihre Forschungsergebnisse vorzustellen und sich auszutauschen.

2.3.1 Erster Workshop (Kick-off)

Auf dem ersten öffentlichen KW21-Workshop "Kick-off" am 14. und 15. Mai 2009 in Ingolstadt wurden am 1. Tag die Inhalte und Ziele der Forschungsinitiative KW21, sowie die einzelnen Arbeitskreise mit ihren Teilprojekten vorgestellt und diskutiert. Am 2. Tag folgte der offizielle Teil mit Gästen aus Politik und Wirtschaft. Dr. Jörg Kruhl, Leiter des Bereichs Technische Grundsatzfragen der Firma E.ON Energie AG, begrüßte als Gastgeber die Teilnehmer und Gäste.





Teilnehmer des "Kick-off" Workshops in der Kraftwerkshalle in Irsching



Die Sprecher des zweiten Tags des "Kick-off" Workshops in der Kraftwerkshalle in Irsching, Dr. Jörg Kruhl, Dr. Wilhelm Rothenpieler, Dr. Daniel Hofmann und Professor Thomas Sattelmayer (v. l. n. r.)

Das offizielle Grußwort sprach Ministerialdirektor Dr. Wilhelm Rothenpieler vom Bayerischen Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst. Danach folgten ein Vortrag von Dr. Daniel Hofmann, Siemens AG und das Schlusswort von Prof. Dr. Thomas Sattelmayer, TU München. Ein abschließender Rundgang durch das Kraftwerk Irsching bot Einblick in den neuesten Stand der Technik innovativer Kraftwerkstechnologie. Mit dem Block 4 des Kraftwerks entstand das modernste Gas- und Dampfturbinenkraftwerk (GuD) der Welt mit einem thermischen Wirkungsgrad von über 60 %.





Gasturbine, Siemens AG (Quelle: Siemens AG)

2.3.2 Zweiter Workshop

Bei dem zweiten Workshop Phase II der Forschungsinitiative KW21 vom 28. bis 29. September 2010 beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT) präsentierten Jungwissenschaftler aus Bayern und Baden-Württemberg in zwei Sitzungen und über 30 Vorträgen erste Ergebnisse ihrer Forschungsprojekte. Weiterhin bestand für die fast 100 Teilnehmer die Möglichkeit sich in informellem Rahmen kennen zu lernen und Informationen auszutauschen.

Eröffnet wurde der Workshop von Prof. Dr.-Ing. Manfred Aigner, dem Baden-Württembergischen Sprecher von KW21, und Dr.-Ing. Peter Fritz, dem Vizepräsidenten für Forschung und Innovation des KIT. Anschließend berichteten die Arbeitskreissprecher über den Status in den jeweiligen Arbeitskreisen.



Als Gastgeber eröffnete Dr. Peter Fritz mit Professor Manfred Aigner den ersten Workshop (Quelle: DLR Stuttgart)



Zwischen den Vorträgen tauschten die Teilnehmer Erfahrungen aus. (Quelle: DLR Stuttgart)



2.3.3 Dritter Workshop

Der dritte Workshop fand vom 10. bis 11. Oktober 2011 im Institute for Advanced Study (IAS) der TU München in Garching statt. Im Mittelpunkt standen bei diesem Treffen der rund 90 Teilnehmer der Erfahrungsaustausch und die Vorstellung der bis dahin erarbeiteten Ergebnisse. Darüber hinaus hatten die Projektbeteiligten die Gelegenheit an Laborführungen teilzunehmen.



(Quelle: Technische Universität München)



3.1 Informationsmaterial

3.1.1 Infoblatt

Ein deutsch- und englischsprachiges Informationsblatt wurde im Rahmen der Mitgliedschaft des Forschungsverbundes KW21 bei der bayerischen Forschungsallianz "Bay-FOR" erstellt. Dieses dient zur Kurzübersicht über den Forschungsverbund KW21 und wurde bei den unterschiedlichsten Veranstaltungen als Informationsmaterial zum Mitnehmen ausgelegt.



3.1.2 Displaywand



Die 2 x 2 m große Displaywand wurde ebenfalls im Rahmen der Mitgliedschaft bei der bayerischen Forschungsallianz BayFOR für die Phase II neu erstellt. Sie lässt sich problemlos auf- und abbauen und bietet daher relativ schnell einen angemessenen Rahmen für alle öffentlichen Ausstellungen, in denen sich KW21 als einzelner Forschungsverbund oder auch zusammen mit anderen bayerischen Forschungsverbünden präsentiert. Ihren ersten Einsatz für KW21 Phase II hatte die Displaywand auf dem Kongress für Energieeffizienz in Nürnberg am 30.09.2009.

3.1.3 Flyer, Projektkarten und Infomappe

Für die Phase II wurden neue Infomappen und Flyer entworfen, die wie die Logo- und Plakatpaneele für die Hannover Messe in das grafische Gesamtkonzept für KW21 Phase II passen. In optisch ansprechender Form und inhaltlich gut verständlich werden alle 50



Projekte auf jeweils einer eigenen Projektkarte vorgestellt. Diese befinden sich als Kartenpaket in der ebenfalls neu gestalteten Infomappe. Passend dazu wurde ein Flyer beschafft, der einen kurzen Gesamtüberblick über die Ziele der Forschungsinitiative KW21, eine Kurzbeschreibung der jeweiligen Arbeitskreise, seine Förderer und Industriepartner, sowie Kontaktadressen der Koordinierungsstellen für Bayern und Baden-Württemberg gibt.

KW21 Flyer (Außenteil)



KW21 Flyer (Innenteil)



long-sector and (E)

In die erstehen Pflasse von 1992 wurden Methoden und Modelle sterenkalt, die vorderstagen, in welche Pflasse and die Ersteinungen ose Sterepare response im Methoden konstellen die Schwalispeer spectrafunger mit Methogenich wei die Derfols der Kreinkerste daren. 21. Juhrhunderte aussahers werd und welche Anforderstrungen an desse Volkerweis zu statie und 15. zugeis die dare unteranfolge Preditage Ditsaret begreung von Northwerker, som zahlte Anstellen Heindel al zu Erstellender gereinstellen die Schwale die Gestatie volken Heindel dar zu Erstellender gereinstellen die die die Gestatie Volken Heindel dar zu Erstellender gereinstellender die die Gestatie volken Heindellen Heindellen dar zu Erstellenderstellen gereinstellender die Gestatie volken die die Schwalten Heindellen Heindellen dar zu Erstellenderstellen gereinstellender die Gestatie volken die die die Schwalten Heindellen dar zu Erstellenderstellen gereinstellender die Gestatie die Schwalten Heindellender dar zu die Bertrechtenderstellender die Schwalten die Schwalten Heindellender dar zu die Bertrechtenderstellender die Schwalten die Schwalten Heindellender dar zu die Bertrechtenderstellender die Schwalten die Schwalten Heindellen Heindellender dar zu die Bertrechtenderstellender die Schwalten die

Be prefer Place we DRT 1987 to the normalized from folia as Para department-folia de Enregional total. De Velitzaneo de Enregio anterior de la companya sociarge sub-mais Specchare, Gentraducente sub-stance for avail de total. De Martidiane placemp antage socia social Martidia de la Debitica tenderal y un de La la prepara las finja de Velitza de La Natidia y un de La la prepara las finja de Velitza de La Natidia y un de La la prepara las finja de Velitza de La Natidia y un de La la prepara las finja de Velitza de La Natidia y un de La Velitza de La Natidia de La Natidia de La Natidia y un de La Velitza de La Natidia de La Natidia de La Natidia y un de

But on Michael and Antonia Marka (Song Deploy): Europecontrolled for ungeneral Softwarford en Units for the important of the softwarford end of the softwarford end of the Minkjeck I Dervan control was for Softwarford and the softwarford end of the softwarford end of the softwarford end of the end of the softwarford end of the softwarford end of the Dervandguard for under the photoestaria for the softwarford end of the softwarford end of the softwarford end of the Dervandguard for the softwarford end of the softwarford end of the softwarford end of the softwarford end of the Dervandguard end of the softwarford end of the softwarford end and the softwarford end of the softwarford end of the Dervandguard end of the softwarford end of the softwarford end and the Softwarford end of the softwarford end of the end and the Softwarford end of the softwarford end of the end of the Softwarford end of the end of the softwarford end of t

Spacherkenspise in Allgemeinen, Derspispeterkensig in Dektribertmagen und Lakturver einer Keinfigen Notzeg aufstrahlten Deurgen auf zur der Kanzelle der Keinfigen Notzeg aufstrahlten er keinigkeit der Schleicher Aufstrahlten des 21. Jahrensteiten, Saerschlicher sich inzur eine Einderweiche Keinfallen Unterstehrt, Saerschlicher sich inzur eine Einderweiche Keinfallen Unterstehrt, Saerschlicher sich inzur eine Einderweicher Keinfallen Unterstehrt, Saerschlicher sich inzur eine Einderweicher Keinfallen Unterstehrt, Teinfalle genetiziertrige Eingesonit, von Artagen einfolgter Indekting understehrtige Eingesonit, von Artagen einfolgter ein erbeit nicht. Dia Franja setu bar Baraismeng de Dytan Folges van Sett das Biogramistiks auf das antidentiferschaften Forfalesenschlang Basteneten Frager, die auf Ange ven Libertikaanse, Uktor das bestehet das die Setter das das die Setter das das das bestehet das Frager name die Antionale Setter das das indexember das anti-folgeparter bestehet die Setter das das das bestehet das die Setter das die Setter das das das das bestehet das die Setter das die Setter das das das das bestehet das die Setter das die Setter das das das das bestehet das die Setter das die Setter das das das das bestehet das die Setter das die Setter das die Setter das die Need durit bestehet en effektiven im das die Setter das die Need durit bestehet en effektiven im das die Setter das die Need durit bestehet en effektiven im das die Setter das die Set

In bacannia uni fraza frazheologi proceso erventen Errekonganga Iranizou ny uni dar Denyherzagung terrachar, erakgiant di artesarangengi chikan erakenalar integra internan garmantia Universitanger and antukongartera (prianny printekalar par Errac). Bei di Mitteratura (prianny printekalar par Errac). Bei di Mitteratura terracio gatati, vandar angermante la Erpérinsa autoritera chier Denteracione di Arteria (printeratoria).

versionagene (1) an in higher to takengin orange Takento in director Thinking out of the program of Antohomous II. Note of the entropy of the taken of the taken of the takent of the takento in takanadow Nill on the Ministrator II. Strategy messa and director parameter for the strate of the protocol of the takento protocol of the Takento II. The takento II. The takento takento II. The takento II. The takento II. The takento takento II. The takento II. The takento II. The takento takento II. The takento II. The takento II. The takento Takento II. The takento II. The takento II. The takento Takento II. The takento II. The takento II. The takento Takento II. The takento III. The takento II. The takento III. The takento II. The takento III. Th

Maler and 71 % does well-wales iterarchystachs are doe durant net benegitar binne godocht. Daren rachnesins Westwertenschung statte sonrte des gothen Hold og an wirringerung and net GL. Ennseinen und zur Schwarz der Primär swergerung versatzen bei der Stratter zussonn den.

Sayturtissen genier one examinelle fisike på der Daktrecklasse sergerg - in grafflichnich realisarken fumtgemass av in Afale Prozessen på Deckary om Lankregispilten, si anginzenden Dereste in Frankrik Madinalisk og konstelle atternation frankrike

Die Turbokemponenten heben wesentlichen Envlisis auf eine Wirkengenalitier Anlagen und comit des Prindenengeweiterund svereite die Nemplantter des Aufbeut.

Transmissionerspecies for Archebiarcies and the Vichoscorpe de Umadhavachister de Cognory approximation et algebrate et al. In the Constraint of the Cognory and Cognory and the Constraint of the Cognory and algebrate Cognory and the Cognory and the Cognory and Cognory and the Constraint of the Cognory and the Cognory and the Constraint of the Cognory and the Cogno

De Sakudellen Malhakimargalaka kalan Opterse orgepolen Sakiber den gesamten Produktioanscplaka - de enfordetien Technistegen staten deret sonräk für des Nanastätist ein einen Krateentaankaper sis sont in seiten Erching für die Nantrastang bestehendet. Anlages nur Vergeung.

entropy for Restartioner (DP)

No Antonier wagsperfit zu en Gar Kontonstweit des Zwart werden der gewehnen gester der Sternen ander Sternen gen Kraftweit zur Kladenberung vers Grenn antonier von der beit were gester Tallsbernisungsprach zum Ananopär aus der kontonisch Schwarkungen bei der Tetromensprackung aus erseweiteren Dasen in beken melle, bis nur inder Grent bestelltes Untredischen Antonip-

gerupe Wertungskacker press forte Brunnstoffleichitzt der möglicher riedingen Bernstöffleichtzt and die ischnach dare Nechschriftlich gelocheren Responstgenigen auf der ischnach Ausenkungen auf die Vertretenungenzungen er Gadarbisseher Ausenkungen

biologic to Biosnatell'Igna Maximum, influence la report option autoria en un Schaltel Universite surger masses en est investigation inclusionen estes aparties la factoria biology en Biogheinerge et dendem estes apartenia la factoria biologica (VVV) trait et dendem estes apartenia la factoria biologica (VVV) et dendem estes apartenia la factoria (de la factoria) este factoria (de la factoria) de la factoria (de la factoria) este factoria) apartenia (de la factoria) de la factoria (de la factoria) este factoria) de la factoria (de la factoria) de la factoria (de la factoria) este factoria) de la factoria (de la factoria) de la factoria (de la factoria) este factoria) de la factoria (de la factoria) de la factoria (de la factoria) de la factoria) de la factoria (de la factoria) de la factoria (de la factoria) de la factoria) de la factoria (de la factoria) de la factoria (de la factoria) de la factoria) de la factoria (de la factoria) de la factoria (de la factoria) de la factoria) de la factoria (de la factoria) de la factoria (de la factoria) de la factoria) de la factoria (de la factoria) de la factoria (de la factoria) de la factoria) de la factoria (de la factoria) de la factoria (de la factoria) della factoria) della factoria (de la factoria) de la factoria) della factoria) de la factoria (de la factoria) della facto

Unsupervised to the Metalement of Vertiliarities to Distributions in a constraint of the Metalement of Vertiliarities on the Net Statistical Constraints of Vertiliarities of the Statistical Constraints of Statistical Constraints of Statistical Constraints and Net Statistical Constraints of Networks and Statistical Constraints and Network of Statistical Constraints (Network) and Network (Network) and Statistical Constraints of Network Constraints Discource Const. NeuroIndexistical Constraints of Network Networks (Network) and Statistical Constraints of Network Network (Network) and Network (Network) and Network (Network) and Network Network (Network) and Network (Network) and Network (Network) and Network Network (Network) and Network (Network) and Network (N



Infomappe



Neue Infokarte am Beispiel BY 17GV

Emissionsverminderung bei der Effizienz- und Leistungssteigerung von Gasturbinen



Aufgrund der Einigen Lebendaur von Gas-turtieren ist es Würk, Machtenen rach für Britisterpreferentrogen in teine wessentliche Etholste weis der Einissionen errorchaus beit weis der Einissionen errorchaus einigt von der einister einigt von der einigt einigt von der einigt von der einigt von der einigt von der einigt von geleich werden, der von einigt weiter geleich von der einigt von geleich weiter der einigt von geleich von der von der einigt von geleich von der einig



Dipl.-ing. Volker Seidel Tel.: +49 (0) 89 289 16255 seideliätd.mix.tum.de

Industriepartner: ALSTOM Power Systems OmbH. Mannheim

Förderer: Staatsministerien för Wissemschaft, Förschung und Kunst sowie för Wirtschaft, Infrastruktur, Verkelar und Technologie en Ratunen des Klimaprogramms Biopers 202

Forschungsinitiative KW21 Kräftwerke des 21. Jahrhunderts www.lsw21.de

BY 17GV



Projektziele und Vorgehen

In dem Vorhalem sollen initialis ales kontia-tiert aperimentellem und namericken An-zer Beenstrag der Micharguszulft allem in-ternation auf ander einer alle allem solltage allem solltage auf alle allem verschreidenung der Flasensenstatikt kei-den Analismen auf einerger luschgreichen um Killauflas-ternationen und heitersteren gilter mit Killauflas-ternationen und heitersteren giltern im Fall ogen heitersteren und kolle-ternationen und heitersteren gilternationen gilter gilter besteren auf heiter ternetersteren gilternationen gilter gilter besteren gilter besteren ternetersteren gilternationen gilter gilter besteren gilter gilter gilter gilter gilter gilter gilter gilter ternetersteren gilternationen gilter In dem Vorhalten seilen mittelle sines kenäl-anet agentmestellis und inzensischen An-satzes zwar Kerrepröbleme untersacht ver-fin. Zum allen sollte. Ditrachen für die Verschlachtunzig der Flainmensischlicht bei der Ansilberung alle eingerer Löckgreise an Fall ann Metholmenergialmen mit Yahl-werten. Zum aberein odie die Einstellung ihner zusätzlichen Machziehung einermodifikationen sollte die Bereitstellung einer zusätzlichen Machziehung einer zusätzlichen sollt mehr hin zu nichtigerer Flainmenterspeatun-nen in der Primaterine verschehen werden, um intersochen KDIL-Einstellenn zur nefu-zieren.



Axistgeschwindigkeitsteld eines Einzel der Brennkammer

Numerik und Experiment



UP meterologian in Namendaria Baranenschen Mathematiken in Was-erkanstversuchen mettels (PV zur Vissalistung die Steffnungstells und LF zur Cha-nahersinnung der Mitchangsüte wildert ausstellte der Bestehen der Bestehen Vertretererungsverschlichtigt und die Steffnung die In stäbelahmen unterstehenden. Der Einfahre der Kälfkählt aus unterstehenden der Kälfkählt auf dereinig, ausgert Erstehen Kälfkählt aus einigen, ausgert Erstehen der Kälfkählt aus einigen, ausgert Erstehenden Vertreter-nungsstabilität alt dabei von größem Inter-ense.





Neue Infokarte am Beispiel BW L 43GV und BW W 43GV



3.2 Internetauftritt

3.2.1 Externe Homepage

Für den Internetauftritt konnten die Internetadressen www.kw21.de und www.kw21.org reserviert werden. Über beide Adressen sind sowohl die externe Seite, als auch die Passwort geschützte interne Seite erreichbar. Es können Informationen zu KW21 allgemein und zu allen Teilprojekten im Speziellen abgerufen werden. Kontaktdaten und Arbeitsfelder von allen Mitarbeitern werden angezeigt sowie die Partner im Verbund aufgelistet. Veröffentlichungen und Pressemitteilungen sind einsehbar. Da der Betrieb der beiden Websites zum 15. März 2014 eingestellt wird, ist danach nur noch die externe Homepage über folgende Adresse erreichbar: www.bayfor.org/kw212

3.2.2 Interne Homepage

Die Interne Homepage diente als internes Informationsmedium für alle KW21- Mitarbeiter. Protokolle und Präsentationen der Lenkungsausschusssitzungen und Workshops konnten hier eingesehen werden. E-Mail-Verteiler, die zur Vereinfachung der internen Kommunikation eingerichtet wurden, ließen sich überprüfen. Aktuelle interne Informationen konnten hier platziert werden und Vorlagen für Berichte, Präsentationen und Briefe konnten herunter geladen werden. Ebenso waren hier die einzelnen Projektkarten und der KW21-Flyer in elektronischer Form verfügbar. Die interne Homepage ist ab 15. März 2014 nicht mehr erreichbar.



3.2 Veranstaltungen

3.3.1 Kongress für Energieeffizienz, Nürnberg



(Quelle: TU München)

Am 30.09.2009 präsentierte sich die Forschungsinitiative auf dem Kongress für Energieeffizienz in Nürnberg

Das Thema Energieeffizienz als zentrales Thema in der Energietechnik und somit auch der Bereich der innovativen Kraftwerkstechnologie erreicht einen zunehmenden Besucherkreis. Während des Kongresses konnten interessante Gespräche mit anderen Teilnehmern und Kongressbesuchern geführt werden.

Präsentationen der einzelnen Arbeitskreise und Projekte wurden erstellt und auf einem Laptop gezeigt.







3.3.2 Hannover Messe 2010

Wie auch in der 1. Phase, präsentierte sich der Forschungsverbund KW21 auf der Hannover Messe 2010 auf dem Gemeinschaftsstand von Bayern Innovativ. Fachleute, Schüler und Studenten aus aller Welt besuchten den Stand. Besonders attraktiv waren die Exponate der Lehrstühle Energiesysteme und Thermodynamik, die in regelmäßigen Abständen vorgeführt wurden, sowie das Dampfturbinenmodell der Firma Siemens.



Bayern Innovativ Gemeinschaftsstand Hannover Messe 2010 (Quelle: Technische Universität München)



Hannover Messe 2010



KW21 Standbetreuung Lehrstuhl für Thermodynamik TU München (Quelle: Technische Universität München)



KW21 Standbetreuung Lehrstuhl für Energiesysteme TU München (Quelle: Technische Universität München)



3.3.3 VGB-Konferenz "Kraftwerke im Wettbewerb 2011" mit Fachausstellung, Karlsruhe



(Quelle: Technische Universität München)

Schwerpunkt der Konferenz vom 29.-31.03.2011 unter dem Motto "Kraftwerke im Wettbewerb 2011" waren die Erfahrungen, die bei der Errichtung neuer Kraftwerksblöcke gewonnen wurden.

Im Wesentlichen ging es um die hohen technischen und organisatorischen Herausforderungen, um die geforderte Funktionalität und Qualität der Komponenten und Systeme zu erzielen. KW21 war mit einem Stand bei der zeitgleich ausgerichteten Fachausstellung vertreten.

3.3.4 Hannover Messe 2012



(Quelle: Technische Universität München)

Auf der Hannover Messe vom 23. bis 27. April konnte sich die Forschungsinitiative KW21 ein zweites Mal auf dem Gemeinschaftsstand von Bayern Innovativ einem großen Publikum vorstellen.

Die Besucher erhielten Einblicke in die Themen Verbrennung und Energiespeicher. Zusätzlich wurde ein Wirbelschichtmodell der TU München gezeigt.

3.3.5 Abschlusssymposium, Stuttgart

Bei dem Abschlusssymposium am 24. und 25. September 2012 im Stuttgarter Haus der Wirtschaft präsentierten die Wissenschaftler ihre Ergebnisse zum Ende der Phase II von KW21. Herr Prof. Aigner eröffnete die Veranstaltung am ersten Tag und begrüßte die rund 100 Teilnehmer und Gäste. Die baden-württembergische Ministerin für Wissenschaft, Forschung und Kunst Theresia Bauer betonte in ihrer Rede, dass die Forschungseinrichtungen in Baden-Württemberg und Bayern im Bereich der Kraftwerkstechnologie international führende Positionen einnehmen. Nach Aussage von Frau Bauer habe KW21 als eine der größten deutschen Initiativen auf dem Gebiet der Energietechnik dazu beigetragen, diese Stellung auszubauen Der anschließende Vortrag des Vorstands für Energie und Verkehr im DLR, Prof. Ulrich Wagner sowie die Grußworte des Vorstandsvorsitzenden der ALSTOM Deutschland AG, Alf Henryk Wulf, des Mitglieds der Geschäftsführung der E.ON



New Build & Technology, Gerhard Seibel sowie des Leiters Forschung, Entwicklung und Demonstration der EnBW Energie Baden-Württemberg AG, Dr. Wolfram Münch rundeten den offiziellen Teil der Veranstaltung ab.

Am Nachmittag des ersten Tages und am 2. Tag des Symposiums konnten die Teilnehmer in zwei parallelen Sessions interessante Vorträge verfolgen und Gespräche mit anderen Projektbeteiligten führen.

Impressionen vom Abschlusssymposium











(Quelle: DLR/Martin Stollberg)





3.3.6 Kongress "Gesellschaft im Wandel – Forschung im Wandel", München



(Quelle: TU München)

Die Bayerischen Forschungsverbünde veranstalteten am 12.11.2012 mit Unterstützung der BayFOR einen Kongress zur Verbundforschung in Bayern.

Die Verbünde präsentierten ihre Rolle in der bayerischen Forschungslandschaft und veranschaulichten wie gesellschaftsrelevante Fragestellungen auch die Forschung beeinflussen. Bei der Fachausstellung bestand für die Besucher die Möglichkeit acht aktuelle Forschungsverbünde, darunter auch KW21, kennenzulernen.

3.3.7 Abschlussbegutachtung Phase II

Am 13. März 2013 fand in Stuttgart die Abschlussbegutachtung statt. Mit der Phase II (2009-2012) endet ein besonders erfolgreiches Forschungsprogramm auf dem Gebiet der innovativen Kraftwerkstechnik in Bayern und Baden-Württemberg. KW21 erarbeitete Grundlagen und Werkzeuge, die zur Entwicklung und zum Betrieb effizienter, emissionsarmer Kraftwerke beitragen. Die engagierte Beteiligung der Wirtschaftspartner unterstreiche die Brisanz und Qualität der Arbeiten und die hervorragende Kooperation zwischen den Hochschulen und der Wirtschaft, so die Gutachter. Besonders lobten sie den Fokus, den KW21 auf die Nachwuchsförderung legte. Durch eine Vielzahl öffentlicher Workshops, Arbeitskreistreffen und Kooperationen der Teilprojekte gelang es den Projektpartnern, eine deutlich bessere Vernetzung als in der ersten Phase zu erreichen. Durch einzelne Nachfolgeprojekte wie etwa in Wirtschaftskooperationen oder in öffentlich geförderten Projekten auf regionaler, nationaler und europäischer Ebene wirkt KW21 über das Projektende hinaus.



3.4 Pressespiegel

In den unterschiedlichsten Medien konnte die Fortführung der Forschungsarbeiten von KW21 bekannt gemacht werden.

- 19.01.2009 Pressemitteilung "KW21 schreibt Erfolgsgeschichte fort", Bayerische Forschungsallianz, Geschäftsstelle BayFOR
- · April 2009 Artikel in den BayFOR News: "KW21 Ende und Wiederbeginn"
- 05.05.2009 Presseeinladung zur "Kick-off" Veranstaltung von KW21 Phase II, im Kraftwerk Irsching, Bayern Innovativ
- 06.05.2009 Pressemitteilung: "Kraftwerke für das 21. Jahrhundert", Informationsdienst Wissenschaft, Bayern Innovativ
- 19.05.2009 Artikel im Donaukurier: "Suche nach dem Kraftwerk der Zukunft"
- Juni 2009 Pressemeldung der Forschungsstelle f
 ür Energiewirtschaft, M
 ünchen, "Die FfE startet Verbundprojekt im Rahmen von KW21"
- Oktober 2009 Artikel in den BayFOR News: "KW21 CO₂ an der Quelle mindern"
- Juni 2010 Faszination Forschung, Das Wissenschaftsmagazin der TUM, Artikel "Simulation statt Trial and Error"
- Juli 2010 Artikel in den BayFOR News: "KW21 Energie ist Zukunft", Hannover Messe 2010
- Mai 2011 Artikel in den BayFOR News: "KW21 Fossile Kraftwerke gewinnen an Bedeutung
- März 2012 Pressemitteilung zur Hannover Messe 2012: "KW21 eine Forschungsinitiative mit großem Potenzial"
- 24.09.2012 Pressemitteilung: "Know-how für die Kraftwerke von morgen: Forschungsinitiative KW21 bereitet den Weg für die Energiewende"
- November 2012 Artikel in den BayFOR News: "KW21 II: Know-how für die Kraftwerke von morgen"
- Ausgabe 2012, Umwelt, Technologie und Energie in Bayern, media mind GmbH & Co.KG: "Umwelt und Energieforschung richtig finanzieren"
- August 2013 Artikel in den BayFOR News: KW21 II: Abschlussbegutachtung



Online Beiträge

- 20.01.2009 Schattenblick, Infopool Umwelt, Industrie, "Kraftwerke des 21. Jahrhunderts" wird fortgesetzt http://www.schattenblick.de/infopool/umwelt/industri/uinfo258. htm
- 20.01.2009 idw-online, Informationsdienst Wissenschaft "KW21 schreibt Erfolgsgeschichte fort", http://idw-online.de/pages/de/news297102
- 20.01.2009 BayFOR online, Pressemitteilungen: "KW21 schreibt Erfolgsgeschichte fort" http://www.bayfor.org/de/oeffentlichkeitsarbeit/presse/kw21-schreibt-erfolgsgeschichte-fort.html,pm51
- 06.05.2009 idw-online Informationsdienst Wissenschaft, "Kraftwerke f
 ür das 21. Jahrhundert", GTCIT Magazine Start der 2. Phase des Forschungsprojekts KW21", http://www.gtcit.com/publicaciond.php?PublicacionId=26634&lang=en
- 20.01.2009 innovations report. Forum für Wissenschaft, Industrie und Wirtschaft, "KW21 schreibt Erfolgsgeschichte fort", http://www.innovationsrport.de/html/berichte/ bildung_wissenschaft/kw21_schreibt_erfolgsgeschichte_fort_125698.html
- 29.09.2010 DLR-Portal, "Brücken bauen in der Kraftwerkswelt" Interview mit Prof. Manfred Aigner, Sprecher der Forschungsinitiative KW21, http://www.energieforschung-bmbf.de/energie_rss
- GTCIT Magazine," Kraftwerke des 21. Jahrhunderts", http://www.gtcit.com/publicaciond.php?PublicacionId=26634&lang=en
- 07.10.2010 KIT, Pressestelle, Kommunikation und Marketing, "Kraftwerke des 21. Jahrhunderts (KW21), Pressemeldung des KIT zum 1. Workshop, http://www.pkm.kit. edu/neues_aus_dem_KIT_2327.php
- Hannover Messe 2010: http://www.hannovermesse.de/suche?directlink=Q91996&reiter=1
- Hannover Messe 2012: "KW21 eine Forschungsinitiative mit großem Potenzial" http:// www.hannovermesse.de/aussteller/forschungsinitiative-kw21/Q963580
- 24.09.2012 DLR-Portal, "Know-how für die Kraftwerke von morgen: Forschungsinitiative KW21 bereitet den Weg für die Energiewende" http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10176/372_read-5300



4 Überblick der Ergebnisse aus den Arbeitskreisen und den Einzelprojekten

Einleitung

In der Phase II von KW21 waren 23 Forschergruppen und 11 Industriepartner beteiligt. Es wurden insgesamt 34 Projekte durchgeführt. Die Darstellung reflektiert die unterschiedlichen Finanzierungsmodi in Baden-Württemberg und Bayern. Während in Bayern die jeweiligen Industriepartner ein gemeinsames Projekt jeweils zu 50 % finanzierten, haben in Baden-Württemberg das Land und die Industrie getrennte Projekte durchgeführt, welche auch getrennt berichtet wurden.

Die Summe der Projekt-Einzelberichte und der Zusammenfassungen der Arbeitskreissprecher zeigen, dass umfangreiche Ergebnisse und Fortschritte erzielt wurden. Insgesamt wurden allein in der Phase II 121 studentische Mitarbeiter ausgebildet sowie 192 Studien-/ Semester- und Bachelorarbeiten, 77 Diplom- oder Masterarbeiten und 41 Dissertationen angefertigt. Die Vernetzung zwischen Industrie, Universitäten und Forschungsstellen sowie der Forscher untereinander wurde wie in Phase I so auch in Phase II in einer großen Zahl von Einzelprojekt-Besprechungen, mehr als 15 Arbeitskreistreffen, acht Lenkungsausschusssitzungen, drei Workshops und einem Abschlusssymposium intensiv gefördert.

Eine der Stärken der Forschungsinitiative lag in der intensiven Kooperation von Wissenschaftlern unterschiedlicher Disziplinen und praxisorientierten Ingenieuren der Kraftwerksindustrie. Dementsprechend sind die technischen Fortschritte sehr vielfältig. Hervorzuheben sind die Erkenntnisse zur Gestaltung der zukünftigen Stromproduktion im Hinblick auf den stark wechselnden Anteil an erneuerbaren Energien, die Ergebnisse zu den neuen Herausforderungen an die Werkstoffe und die Betriebsweisen durch den Einsatz alternativer Brennstoffe. Es wurden innovative Berechnungsverfahren und Messtechniken entwickelt, um die technischen Komponenten eines Kraftwerks bezüglich Wirkungsgrad und Betriebsflexibilität noch weiter zu optimieren und die Zuverlässigkeit zum Beispiel durch die Vermeidung von Verbrennungsinstabilitäten zu verbessern. Diese Vielfalt belegt die Themenbreite von KW21: Hier haben Experten aus sehr unterschiedlichen Fachrichtungen zusammen gearbeitet und damit die Lösung von interdisziplinären Fragestellungen ermöglicht.

Im Weiteren werden nun die Ergebnisse aller Einzelprojekte zusammenfassend dargestellt.

4.1 Energiewirtschaft

Owe Jönsson, E.ON SE, Düsseldorf

Ausgangspunkt des Arbeitskreises ist die Fragestellung, wie ein nachhaltiges Energiesystem ohne negative Einschränkungen in Energiewirtschaft oder Versorgungssicherheit erreicht werden kann. Der stark anwachsende Anteil von Stromeinspeisungen aus Erneuerbaren Energien führt zu neuen technischen sowie wirtschaftlichen Herausforderungen für die Energiewirtschaft.



Die Projekte im Arbeitskreis Energiewirtschaft haben sich alle mit unterschiedlichen Themen der zukünftigen Energielandschaft beschäftigt:

- Wie können Elektroautos für Energiespeicherung verwendet werden und welche Auswirkungen wird das auf das zukünftige Lastverhalten haben?
- Welche Rolle wird Energiespeicherung in der Zukunft spielen und welche sind die Schlüsseltechnologien?
- · Welche Rolle wird Erdgas als Energiequelle in der Zukunft spielen?
- Wie kann ein Energieunternehmen sich an die neuen Voraussetzungen und ggf. die Kraftwerksportfolio an die neuen Bedingungen anpassen?

Die Teilprojekte des Arbeitskreises haben zu einem wesentlich besseren Verständnis für die Herausforderungen eines zukünftigen Energiesystems geführt. Die Rolle von stationären und mobilen Energiespeichern wurde deutlich untersucht und die Möglichkeiten zur Optimierung des laufenden Kraftwerksportfolios in einer Landschaft mit zunehmendem Anteil von RES dargestellt.

BY 1E: Integration und Bewertung erzeuger- und verbraucherseitiger Energiespeicher

Im Teilprojekt BY 1E – Energiespeicher wurde das wirtschaftliche Potential für großtechnische erzeugerseitige Speicherung und der Einfluss verbraucherseitiger Speicher in einem Stromsystem mit wachsendem Anteil fluktuierender Erzeugung modellgestützt untersucht. Für diese Fragestellung war ein Modell zu entwickeln, welches den Ausbau konventioneller Kraftwerke und großtechnischer Speichertechnologien gleichwertig unter gegebenen Rahmenparametern bis zum Jahr 2050 optimiert. Der Fokus der Modellgestaltung lag dabei auf einer möglichst detaillierten Abbildung der Speicheroptionen im Hinblick auf die technischen Freiheitsgrade und eine hohe zeitliche Auflösung. Im Bereich der verbraucherseitigen Speicherung wurden stellvertretend der optimierte Betrieb von Elektrofahrzeugen, Kühlschränken und Speicherheizungen untersucht.

Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, dass ein verstärkter Ausbau an erneuerbaren Energien zu einem wachsenden wirtschaftlichen Potential für großtechnische Speichertechnologien führt. Alle im Projekt betrachteten Technologieoptionen finden dabei einen Platz im Portfolio. Die kurzfristige Speicherung wird von Pumpspeicherwerken und adiabaten Druckluftspeichern realisiert, wohingegen die Wasserstoffspeicherung im Wesentlichen saisonal zum Einsatz kommt. Die optimale Dimensionierung der Anlagen hängt stark von der jeweiligen Technologie ab und liegt vor allem im Bereich der Speicherkapazität um Größenordnungen über den aktuell installierten Pumpspeicherwerken. Die untersuchten Möglichkeiten der verbraucherseitigen Speicherung führen durchwegs zu einer Verringerung des wirtschaftlichen Potentials an großtechnischer Speicherung, jedoch in unterschiedlichem Ausmaß.


BY 2E: Einsatzmöglichkeiten von Elektrostraßenfahrzeugen zum Lastmanagement

Unter der Annahme, dass sich Elektrostraßenfahrzeuge mittel- bis langfristig im Markt durchsetzen und die regenerative Stromerzeugung an Bedeutung gewinnt, werden sich in Deutschland/Europa die Netzverhältnisse grundsätzlich verändern.

Ziel dieses Projektes war die Erarbeitung von Konzepten, wie das Laden von Elektrostraßenfahrzeugen in Zukunft erfolgen soll, und dabei möglicherweise Netzdienstleistungen übernehmen kann.

Die Ergebnisse umfassen sowohl eine energiewirtschaftliche Betrachtung, als auch eine Analyse der Rückwirkungen verschiedene Ladealgorithmen auf die Abnutzung der Batterie.

BY 3E: Simulationsgestützte Prognose des elektrischen Lastverhaltens bis 2030

Für Planung und Auslegung zukünftiger Kraftwerke sowie zur Beurteilung der Notwendigkeit von Speichersystemen werden möglichst genaue Lastgangprognosen der Verbraucherlast benötigt. Je detaillierter die Prognosen sind, desto besser können die darauf aufbauenden Arbeiten die Zukunft der Energieversorgung abbilden. In diesem Projekt wurde ein Energieverbrauchsmodell entwickelt, welches einen zukünftigen Verbraucher-Stromlastgang generieren kann. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Dynamisierung von Lasten im Rahmen von Demand-Side Management und Demand Response gelegt, welche sich zukünftig deutlich in der Verbraucherlast zeigen wird.

BW L 21E: Modell zur Portfolioauswahl in der Elektrizitätswirtschaft – Entwicklung eines Modells zur Bestimmung optimaler Erzeugungsportfolios zur Gewährleistung der langfristigen Versorgungssicherheit

Investitionen in thermische Kraftwerke stellen strategische Entscheidungen unter Unsicherheit dar (z.B. Energieträger- und CO₂-Preisrisiken, politische Ungewissheiten). Neben der klassischen Kapitalwertmethode bietet die Übertragung der Portfolioauswahl auf die Elektrizitätswirtschaft die Möglichkeit, das Risiko zu erfassen und zu bewerten, dass die erwartete Zielgröße, z.B. die angestrebten Kosten, nicht erreicht wird.

Ziel dieses Teilprojekts war die Entwicklung und Anwendung eines Modells zur Minimierung der risikogewichteten Systemkosten eines Elektrizitätserzeugungssystems unter Berücksichtigung unsicherer Einflussgrößen auf die Erzeugungskosten der verschiedenen Kraftwerke. Portfoliobasierte Investitionsentscheidungen liefern als wesentliches Modellergebnis diversifizierte Portfolios, die in Bezug auf die erwarteten Kosten und hinsichtlich des Risikos (z.B. Verfehlung der erwarteten Kosten) effizient sind. Durch Berücksichtigung subjektiver Risikopräferenzen kann aus der Menge der effizienten Portfolios das für den Entscheidungsträger optimale Portfolio dargestellt werden.



BW L 22E: Entwicklung eines Modellansatzes zur integrierten Analyse von Erdgasbereitstellung, Erdgastransport und Erdgasverbrauch in Europa

In Bezug auf die Energieversorgung und deren Ausgestaltung im Hinblick auf die energiepolitischen Ziele Versorgungssicherheit, Wettbewerbsfähigkeit, Nachhaltigkeit sowie Umwelt- und Klimaverträglichkeit wird dem Erdgas eine weiter wachsende Bedeutung weltweit zugeschrieben. Um diesem Zielbündel gerecht zu werden und um die Vielschichtigkeit der Aspekte beim Erdgasangebot, bei der -verteilung und bei der Erdgasnachfrage erfassen zu können, wird die Versorgungssicherheit der europäischen Erdgasversorgung mittels einer integrierten, modellgestützten, gesamtsystemaren Betrachtung analysiert.

Innerhalb des Teilprojektes wurde, aufbauend auf einem bestehenden Modellansatz und -datensatz TIMES PanEU, der Modellansatz dergestalt weiter entwickelt, dass die Perspektiven der Stromerzeugung aus Erdgas und die Nutzung von Erdgas als Energieträger im Rahmen der europäischen Erdgasversorgung integriert ausgewiesen werden können. Im Rahmen von Szenariobetrachtungen und Sensitivitätsanalysen kann mit Hilfe des weiterentwickelnden Modells das Potenzial von Erdgas für das europäische Energiesystem hinsichtlich der Aspekte Wirtschaftlichkeit, Umwelt- und Klimaschutz sowie Versorgungssicherheit integriert bewertet werden.

4.2 DE: Kraftwerkssysteme und Dampferzeuger

Dr. Martin Käß, EnBW Erneuerbare und Konventionelle Erzeugung AG, Stuttgart

Bei den Projekten des Arbeitskreises DE wurden in den Bereichen Feuerung und Dampferzeugung sowohl Optimierungen bereits eingesetzter Technik als auch Entwicklungen neuer Technologien durchgeführt. Berücksichtigung fanden die Brennstoffe Kohle, Abfall und Biomasse. Wesentliche Ziele der Projekte betrafen die Steigerung von Effizienz und Wirtschaftlichkeit sowie die Reduzierung von Instandhaltungsaufwendungen, verbunden mit einer Steigerung der Verfügbarkeit. Die Aufgabenstellungen wurden unter Einsatz verschiedener experimenteller Untersuchungsmethoden im Labor- und Technikumsmaßstab durchgeführt. Der Einsatz und die Weiterentwicklungen von CFD-Simulationen hatten einen wesentlichen Anteil bei der Bearbeitung der komplexen Aufgabenstellungen. Weiterhin kam der Validierung von Simulationsergebnissen mit den Ergebnissen experimenteller Untersuchungen eine große Bedeutung zu. Die Projekte des Arbeitskreises deckten im Bereich Feuerungsanlagen ein breites Feld der Themenstellungen Brennstoffflexibilität, Verschmutzung und Verschlackung verbunden mit Korrosionsschutz sowie Emissionsminderungen ab. Weiterhin wurden Fragestellungen zur Dynamik des Wasserdampfkreislaufs und zum 700°-Kraftwerk bearbeitet.

BY 4 DE: Reduktion von Verschlackungstendenzen

Verschmutzungen und Verschlackungen in heutigen Dampferzeugern spielen nach wie vor eine wichtige Rolle, um einen sicheren und effizienten Betrieb der Anlage zu gewähren. Basierend auf einer breiten Brennstoffpalette sollten im Labormaßstab umfangreiche, grundlegende Untersuchungen durchgeführt werden, um den Prozess der Ascheablagerung besser zu verstehen.

Überblick der Ergebnisse



Im vorliegenden Abschlussbericht werden die Ergebnisse des Projektes vorgestellt. Sie dienen zur Ermittlung von Verschlackungsneigung und Depositionsverhalten verschiedener fester Brennstoffe anhand von Laboranalysen und Experimenten. Die entwickelten Modelle wurden in CFD-Simulationen integriert und deren Ergebnisse mit Experimenten verglichen und validiert. Daraus sollen Methoden und Modelle abgeleitet werden, die es dem Betreiber von Anlagen ermöglichen die Verschmutzungs- und Verschlackungsneigung auf Basis einfacher Analysen zu beurteilen und einen sicheren Betrieb der Anlage zu gewährleisten.

BY 5 DE: Dynamische Simulation von 700° C-Kraftwerken

An die Dynamik von Hochtemperaturdampfkraftwerken sind ähnlich hohe Anforderungen wie an die von konventionellen Kraftwerken zu stellen. Besonderes Augenmerk gilt den dynamischen Vorgängen, denn durch den stetigen Ausbau fluktuierender Energieerzeugung, wie Wind und Solar, muss die Ermüdungsschädigung genauer betrachtet werden. Im Rahmen des KW 21 Phase II – Forschungsvorhabens (BY 5DE) sollte ein Programm zur Simulation der Dynamik eines 700 °C-Steinkohleblocks erstellt werden, um leittechnische Vorgaben zu entwickeln, den Lebensdauerverbrauch zu berechnen und die Auslegung überprüfen zu können. Bisher erfolgte die Optimierung der Kraftwerke weitgehend im Hinblick auf vorgegebene stationäre Betriebspunkte mit Blickrichtung auf ein technisch-wirtschaftliches Optimum. Das Teilprojekt lieferte Ergebnisse, anhand derer die Betriebskosten eines 700 °C-Kraftwerks ermittelt und optimiert werden konnten. An-, Abfahrphasen und der Leistungsbetrieb waren Bestandteile der Simulation. Dabei wurde die Erschöpfung ausgewählter dickwandiger Komponenten laufend berücksichtigt. Weiterhin wurden in einer gekoppelten Simulation die Auswirkungen von Rauchgasschieflagen und Heizflächenverschmutzung auf die Membranwand und Überhitzer betrachtet.

BY 6 DE: Effiziente Energieerzeugung aus Abfall

Im Arbeitspaket Wasserdampfkreislaufberechnungen wurden die Hauptunterschiede zwischen Müllverbrennungsanlagen und Kohlekraftwerken analysiert. Durch Implementierung von Niedertemperaturwärmenutzung für die Luftvorwärmung und regenerative Speisewasservorwärmung konnte ein elektrischer Nettowirkungsgrad von 35 % erreicht werden. Im Dezember 2010 wurde eine Messkampagne an der MVA in Amsterdam durchgeführt. Diese Messdaten wurden benutzt, um die entwickelten CFD-Modelle zu validieren. Diese Modelle wurden daraufhin benutzt einen fiktiven Kessel mit stark gestufter Verbrennung zu optimieren. Dieser Kessel erreichte geringe Roh-NO_x-Werte und tiefere Temperaturen im Feuerraum, was sich positiv auf die Ascheablagerungen in diesem Bereich auswirkt. Des Weiteren wurde ein Modell zur Freisetzung von Flugaschepartikel aus dem Brennbett implementiert. Asche-Depositionen aus den drei Leerzügen der MVA-Amsterdam wurden analysiert und es konnte im Vergleich zu anderen Anlagen ein geringerer Chlorgehalt festgestellt werden, dies ist auf die längere Verweilzeit zurückführen. Die zweite Messkampagne mit weiterer Validierung der CFD-Modelle findet im November 2012 in Coburg statt.



BY 7DE: Nanokeramische Funktionsschichten auf Precursorbasis als Korrosionsschutz für Müll- und Biomasseverbrennungsanlagen

In Müll- und Biomasseverbrennungsanlagen wird Abwärme zur Energieerzeugung genutzt. Die verwendeten Bauteile wie Verdampferrohre und Endüberhitzerflächen sind dabei rauchgasseitig einer starken korrosiven Belastung ausgesetzt, was zu hohen Instandhaltungskosten und langen Ausfallzeiten führt. Um die korrosiven Schäden zu verringern, werden derzeit u.a. metallische und keramische Beschichtungen verwendet, welche jedoch oftmals keine ausreichende Schutzfunktion besitzen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde daher ein innovatives Korrosions- und Abrasionsschutzsystem auf Basis nanokeramischer Precursorschichten entwickelt. Hierzu wurde eine Verfahrensroute zur Applikation und thermischen Auslagerung der Schichten erarbeitet, die Schichteigenschaften umfangreich charakterisiert, Korrosions- und Abrasionstests entwickelt und durchgeführt sowie die keramischen Schichten mittels Sondenund Rohrproben in Verbrennungsanlagen evaluiert. Es konnten dichte, gut haftende, ca. 100 µm dicke sowie thermisch, chemisch und mechanisch beständige Schichtsysteme auf Basis gefüllter Precursoren entwickelt werden. Derartige Schichten weisen ein großes Potential zum Schutz von Wärmetauscherflächen in Müll- und Biomasseverbrennungsanlagen auf.

BW L 25DE: Untersuchung der flammlosen Oxidation zur schadstoffarmen und effizienten Verbrennung von Kohlestaub in Kraftwerken

Ziel des Vorhabens war es, einen neuen Kohlenstaub-Brenner basierend auf der FLOX®-Technologie zu entwickeln, ein mit diesem Brennertyp befeuertes Kraftwerk zu konzipieren sowie den Einfluss des Brenners auf den Kraftwerksbetrieb zu bewerten. Hierzu wurden Versuche für verschiedene Brennerkonfigurationen (Position und Anzahl der Sekundär-/Primärlufteinlässe) an einer 20 kW_{th} Versuchsbrennkammer durchgeführt. Dabei wurde eine NO_x-Reduktion von bis zu 60 % bei ungestufter Luftzufuhr und bis zu 30 % bei gestufter Luftzufuhr erreicht, verglichen mit einem Flammenbrenner. Es wurden Braun- und Steinkohlen untersucht, der Ausbrand war jeweils vergleichbar gut. Um die gewonnenen Erkenntnisse auf größere Anlagen übertragen zu können, wurden mittels CFD-Simulationen mehrere Varianten mit unterschiedlichen Brenneranordnungen untersucht und ein vielversprechendes Konzept aufgezeigt. Die in den Experimenten identifizierten Schlüsselparameter wurden durch die CFD-Simulationen gut wiedergegeben, so dass auch für ein FLOX®-befeuertes Kraftwerk verringerte NO_x-Emissionen zu erwarten sind.

BW L 26DE: Untersuchung der physikalisch-chemischen Vorgänge bei der Umwandlung von Kohlemineralien zur Reduktion von Verschlackungstendenzen an den Strahlungsheizflächen moderner Kraftwerke

Um einen optimierten Betrieb moderner Kraftwerke durch Reduzierung der Verschlackungsproblematik von Strahlungsheizflächen zu ermöglichen, wurden Untersuchungsmethoden entwickelt, um das Verständnis der Depositionsbildungsvorgänge durch experimentelle Versuche und Probenahmetechniken zu vertiefen. Neben der Standardanalytik wurde gezielt auf die detaillierte partikelbezogene mineralogische und physikalisch-

Überblick der Ergebnisse



chemische Charakterisierung des Brennstoffs, wie auch der Aschen und Depositionen Wert gelegt. Ein Schwerpunkt war die Untersuchung und die Beurteilung des Belagaufbaus auf gekühlten und ungekühlten Depositionssonden. Mit der gekühlten Sonde wurde die Initialschicht, die sich auf den Kesselrohren bildet, untersucht, während mit der ungekühlten Sonde die Untersuchungen im Hinblick auf die Deckschicht durchgeführt wurden.

Verschiedene Steinkohlen wurden sowohl in einem Großkraftwerk als auch in Versuchsanlagen im Hinblick auf deren Verschmutzungs- und Verschlackungsneigung detailliert untersucht. Ein Hauptergebnis sind eisenreiche Partikelzusammensetzungen der Initialschichten im Gegensatz zu der Deckschicht unmittelbar vor dem Überhitzerbereich. Dieses "Eisenphänomen" in der Initialschicht wurde durch zielgerichtete Versuche unter verschiedenen Bedingungen (oxidierende und reduzierende Atmosphäre) mit einem eisenhaltigen Mineral (Pyrit) näher untersucht. Diese Ergebnisse bestätigen die auch in Veröffentlichungen gefundene Tendenz, wonach die Verschmutzungs- und Verschlackungsneigung bedeutend durch reduzierende Bereiche im Kessel beeinflusst wird, welche große Auswirkungen auf die Mineralumwandlungsprozesse haben.

BW L 27DE: Grundlegende experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Entwicklung von innovativen Brennertechnologien und Feuerungskonzepten für den Einsatz in CO₂-armen Kohlekraftwerken (Oxyfuel-Kraftwerken)

Um ein schadstoffarmes Feuerungskonzept entwickeln zu können, wurden am elektrisch beheizten Reaktor (20 kW_{th}) des IFK umfangreiche Parameterstudien im Hinblick auf die NO_x-Reduktion durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Stufungsvarianten vermessen sowie der Einfluss der Zudosierung von NO zur Nachbildung einer Rauchgasrezirkulation analysiert. Damit konnte gezeigt werden, dass die gestufte Betriebsweise – ebenso wie bei der konventionellen Luftverbrennung – auch für die Verbrennung unter Oxyfuel-Bedingungen eine vielversprechende Maßnahme zur NO_x-Reduktion darstellt und bis zu 100 % des zudosierten NO abgebaut werden kann. Weiterhin wurden Untersuchungen zum Einfluss einer trockenen und feuchten Rezirkulation auf die NO-Bildung durchgeführt. Für einige der betrachteten Flammeneinstellungen wirkte sich eine Zugabe von Wasserdampf positiv auf die NO-Reduktion aus.

Der Schwerpunkt der Modellentwicklung wurde auf die Simulation der Oxyfuel-Verbrennung von Steinkohle gelegt. Entsprechend wurde das Pyrolyse-Modell sowie die Beschreibung der Koksumwandlung angepasst und erweitert. Die Modellvalidierung erfolgte anhand der Versuchsergebnisse. Es hat sich gezeigt, dass die Simulationen in allen untersuchten Fällen die richtigen Tendenzen bzgl. Wärmefreisetzung, Temperaturverlauf und Gaskonzentrationsprofilen wiedergeben. Bis auf geringfügige Abweichungen im Brennernahbereich können generell auch die quantitativen Daten aus den Experimenten gut reproduziert werden. Durch die Modellerweiterungen konnten somit teilweise signifikante Verbesserungen in der Vorhersagegenauigkeit erzielt werden.



BW L 29DE: Untersuchung von Schweißverbindungen an Nickellegierungen

Zur optimalen Ausführung von Schweißnähten und zur Vermeidung von Fehlern in Schweißnähten an Nickelbasislegierungen Alloy 617 und Alloy C263 wurden verschiedene Einflussparameter gezielt untersucht, z.B. chemische Zusammensetzung von Grundund Schweißzusatzwerkstoffen, Schweißparameter sowie Eigenspannungen.

In erster Linie wurden metallografische Untersuchungen nach dem Schweißen an verschieden ausgeführten Schweißverbindungen durchgeführt. Mithilfe der thermischen Simulation wurden die Bereiche der Wärmeeinflusszone ausgewählter Schweißnähte nachgebildet und unter unterschiedlichen Bedingungen geprüft, um die auftretenden Versagensmechanismen zu charakterisieren. Die entsprechenden Parameter hierfür wurden aus den durchgeführten Messungen der Temperaturfelder während des Schweißens gewonnen. Auf numerischem Wege wurde versucht, die durch das Schweißen entstehenden Eigenspannungen abzuschätzen. Hierzu wurden verschiedene Geometriemodelle verwendet und die vorhandenen Werkstoffgesetze entsprechend ertüchtigt. Im Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen zeigte sich eine relativ gute Übereinstimmung der Werte.

4.3 DT: Fluiddynamik und Dampfturbine

Dr. Dirk Goldschmidt, Siemens AG, Mülheim an der Ruhr

Mehr als 71 % des weltweiten Strombedarfs werden derzeit mit Dampfturbinen gedeckt. Deren technische Weiterentwicklung stellt somit den größten Hebel zur Verringerung von CO_2 -Emissionen und zur Schonung der Primärenergieressourcen bei der Stromerzeugung dar.

Ansatzpunkt der Arbeiten in Phase II von KW21 war, wie schon in der Phase I, die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit von Dampfturbinen durch Optimierung des "Kalten Endes". Tropfenkondensation und in der Folge Erosionsvorgänge, die einen erheblichen Einfluß auf den Wirkungsgrad der Turbine und die Lebensdauer von Niederdruck-Laufschaufeln haben, sowie das Studium der Strömungsverhältnisse in Diffusor und Abdampfgehäuse, insbesondere bei beengten

Platzverhältnissen, bildeten einen Schwerpunkt der Forschungsarbeiten. Außerdem wurde das rotordynamische Verhalten von radialadaptiven Dichtsystemen für Dampfturbinen untersucht und auf dem Gebiet der Werkstofftechnik wurden Schweißverbindungen zwischen hochwarmfesten Werkstoffen betrachtet. Im Themenfeld Wasserturbinen war das Ziel die Verbesserung des Teil- und Überlastverhaltens durch verbesserte Auslegungswerkzeuge.



Bilanz des Arbeitskreises

Einer der Schwerpunkte der im Rahmen des KW21 durchgeführten Untersuchungen befasste sich mit der Vorhersage des Verhaltens von Dampfturbinen im Naßdampfgebiet. Hierzu gehörten neben der aerodynamischen Analyse der Beschaufelung im Nennbetrieb auch die Bewertung des Normstufensatzes unter extremen Teillastbedingungen (Ventilationsbetrieb). Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Festlegung der Betriebsbereichsgrenzen ein und erhöhen somit die Betriebssicherheit. Die numerische Bestimmung der Nässeabscheidung an der letzten Leitschaufelreihe konnte genutzt werden, an einigen Endstufen einen Teil der Absaugeschlitze einzusparen und dadurch das Design zu vereinfachen. Eine der Veröffentlichungen auf diesem Thema wurde mit einem Best Paper Award ausgezeichnet.

Ein weiterer Schwerpunkt war die Untersuchung der Erosionsbeständigkeit verschiedener Dampfturbinen-Schaufel-Werkstoffe mit Hilfe eines Erosionsversuchsstandes. Der verwendete Versuchsstand bildete die in einer realen Maschine herrschenden Bedingungen, die Nässe und die Tropfenaufschlagsgeschwindigkeit, nach. Neben unterschiedlichen Materialien, wurde der Einfluß des Auftreffwinkels, der Einfluß der Tropfengröße und der Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit auf den Erosionsfortschritt untersucht, sowie das Erosionsverhalten über der Zeit gemessen. Ergänzt wurden die praktischen Untersuchungen durch analytische und numerische Untersuchungen des Tropfenaufschlags im Einzelnen, sowie des Erosionsprozesses im Gesamten. Die so gewonnenen Erkenntnisse bzgl. des Erosionsverhaltens der einzelnen Schaufelwerkstoffe bilden die Grundlage eines verbesserten Bewertungsprozesses von Tropfenschlagerosion und fließen in die Wahl des zu verwendenden Werkstoffes bei der Schaufelentwicklung ein.

In einer weiteren Aktivität wurden unterschiedliche Merkmale von Dampfturbinen-Abdampfgehäusen auf ihren Einfluß auf den Druckrückgewinn untersucht. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sind in Auslegungsregeln zur qualitativen Bewertung von Umbaumaßnahmen eingeflossen und helfen beim Bewerten von Umbauprojekten (Retrofits) und dem daraus resultierenden schnelleren und qualitativ besseren Erstellen von Angeboten neuer Umbauprojekte. Darüber hinaus tragen die Ergebnisse zu einer genaueren Beurteilung der Maßnahmen zur Leistungsverbesserung in solchen Anlagen bei.

BY 8DT: Einfluss von Druckschwankungen auf die Dauerfestigkeit von Francis Turbinen

Im Rahmen des Teilprojekts sollte ein ausführliches numerisches Verfahren entwickelt werden, welches die Vorhersage der Lebensdauer von Francis Laufrädern ermöglichen sollte. Mit dessen Hilfe sollten unerwartete Strukturschäden sowie Maschinen- und Stromausfälle künftig vermieden werden.

Der erste Teil des Verfahrens bestand in der instationären CFD-Simulation der Strömung durch die gesamte Wasserturbine. Bei den numerischen Berechnungen wurden hybride Turbulenzmodelle, wie SAS und DES, eingesetzt und verschiedene Betriebspunkte berücksichtigt. Die numerischen Ergebnisse wurden mit den experimentellen Werten aus dem Modellversuch verglichen und erzielten eine sehr gute Übereinstimmung. Mittels der Strömungsberechnung wurden das dynamische Druckfeld und die Druckschwankungen in der Turbine bestimmt, welche als Ausgangspunkt für die instationäre Finite-Elemente-



Simulation der Laufradstruktur dienten. Die Strukturberechnung lieferte unter anderem die durch die Strömung verursachten statischen und dynamischen mechanischen Spannungen im Laufrad.

Die Ergebnisse aus der Struktursimulation wurden in Hinblick auf die Lebensdauer des Laufrads ausgewertet. Außerdem wurde der Einfluss der einzelnen Betriebsbedingungen auf die Lebensdauer des Laufrads untersucht. Damit sollte man in der Lage sein, präzise Vorhersagen über den Betriebsbereich schnellläufiger Francis Turbinen zu treffen.

BY 9DT: Rotordynamische Eigenschaften von Bürstendichtungen

Im Teilprojekt BY 09DT wurden die Auswirkungen der ständigen Optimierung von internen Dichtsystemen auf die Rotordynamik von Dampfturbinen untersucht. Am Lehrstuhl für Energiesysteme wurden hierfür unterschiedliche Ausführungen von kombinierten Labyrinth- Bürstendichtungen mittels zwei unabhängigen Experimenten auf ihre Steifigkeitsund Dämpfungseigenschaften sowie auch auf das Leckageverhalten hin getestet. Die gezielte Variation der Betriebsparameter sowie die Untersuchung unterschiedlicher Dichtungsdesigns ermöglichte ein besseres Verständnis für den betriebssicheren Einsatz von Bürstendichtungen. Dies soll eine weitere Verbreitung und die damit verbundene Ausschöpfung des Optimierungspotentials dieser Technologie vorantreiben. Weiterhin wurden Temperaturmessungen in der Kontaktzone der Bürstendichtungen unter wechselnden Betriebsbedingungen durchgeführt.

Die untersuchten Dichtungssysteme wurden mittels CFD Simulation modelliert und die Ergebnisse mit den Messungen validiert. Die Simulation ermöglicht eine Untersuchung der Dichtsysteme in einem deutlich erweiterten Betriebsbereich sowie ein besseres Verständnis der dichtungsinternen Strömungsverhältnisse.

BW L 31DT: Anisotherm beanspruchte Mischverbindungen

Ziel des Projekts war die Beschreibung des temperaturabhängigen Verhaltens von Schweißverbindungen zwischen einem 10 %-Chromstahl und einer Nickelbasislegierung. Insbesondere sollten dabei die Versagensorte in Abhängigkeit der Beanspruchungsart untersucht werden.

Bei einer ersten Versuchsschweißverbindung traten im Zeitstandversuch Brüche in der Fusionslinie auf. Dazu wurde eine Reihe von Versuchen durchgeführt und ausgewertet. Weitere nachgelieferte Versuchsschweißverbindungen wiesen im Gegensatz dazu das Versagen im Grundwerkstoff bzw. der Wärmeeinflusszone (WEZ) des 10 %-Chromstahls auf. Aus diesem Grund wurden Warmzug und Zeitstandversuche mit WEZ-gefügesimulierten Proben durchgeführt.

Anhand der ermittelten Ergebnisse wurden Berechnungs- und Bewertungsvorschriften entwickelt sowie numerische Simulationen des Turbinenrotors durchgeführt, die nach Abschluss länger laufender Versuche (Versuchslaufzeiten teilweise > 30.000 h, d.h. > 3,5 Jahre) noch weiter verifiziert werden müssen.



BW L 32 DT: Tropfengrößeneinfluss auf Erosionsvorgänge

Die Ziele dieses Projekts waren, das Erosionsverhalten einer Titan- und dreier verschiedener Stahllegierungen zu untersuchen, im Speziellen die Widerstandsfähigkeit dieser Dampfturbinenschaufelmaterialien zu evaluieren und den Einfluss der Tröpfchengröße auf den Erosionswiderstand zu untersuchen. Um die mit der Tropfenschlagerosion von Turbinenschaufeln zusammenhängenden genannten Ziele zu erreichen, wurden numerische Berechnungen unter Anwendung zweier unterschiedlicher Finite-Elemente-Erosionsmodelle durchgeführt. Das erste Modell basiert auf der Verwendung der "ALE adaptive meshing technique" und der ABAQUS-Benutzersubroutine UMESHMOTION. Das zweite Erosionsmodell basiert auf der Schädigungsentwicklung in Verbindung mit der "element removal"-Methode. Anhand dieser Modelle wurde eine Korrelation des Erosionswiderstands der Dampfturbinenschaufelmaterialien mit einer oder mehreren mechanischen Eigenschaften dieser Werkstoffe hergestellt. Mit Hilfe dieser Modelle kann der Bedarf an zusätzlichen experimentellen Untersuchungen reduziert werden oder unter Umständen sogar ganz entfallen.

BW L 33DT: Innovatives Diffusordesign unter beengten geometrischen Bedingungen

Die innerhalb dieses Projekts durchgeführten Messungen am Axial-Radial-Diffusorversuchsstand des Instituts für Thermische Strömungsmaschinen der Universität Stuttgart und die versuchsbegleitenden Simulationen mit Methoden der numerischen Strömungsmechanik (CFD) führten zu einer Reihe neuer Erkenntnisse über die Abdampfgehäuseströmung von Niederdruckdampfturbinen.

Die wichtigsten Ergebnisse wurden als Vortrag und Konferenzveröffentlichung auf der internationalen Gasturbinen-Konferenz "ASME Turbo Expo 2011" präsentiert. Der positive Einfluss von Querblechen als Stützkonstruktion in Abdampfgehäusen auf die Diffusor-strömung ist dabei die Haupterkenntnis der experimentellen Arbeiten.

Die CFD-Untersuchungen mit "design-tauglichen" Modellierungsmethoden zeigen die Anwendbarkeit heutiger CFD-Berechnungen für die Gestaltung von Abdampfgehäusen. Eine zuverlässige Vorhersage des Ablösepunktes der Diffusorströmung ist jedoch mit solchen Methoden noch immer nicht möglich.

Das Projekt BW L 33DT wurde vollständig bearbeitet und termingerecht abgeschlossen.

BW L 34DT: Tropfenpopulation in Niederdruck-Dampfturbinen

Auf dem Weg zu einer gesellschaftlich angestrebten Energiewende lässt sich eine möglichst umwelt- und ressourcenschonende Energiebereitstellung nur erreichen, wenn auch bestehende Konzepte hocheffizient realisiert werden. Potentiale zur Wirkungsgradsteigerung werden in Dampfturbinen speziell im Niederdruckteil vermutet. Die durchgeführten Untersuchungen der dort standfindenden Kondensation mittels experimenteller und numerischer Methoden offenbaren ein Verbesserungspotential in der Profilauslegung und legen den Grundstein für eine mögliche Optimierung.



Die experimentelle Arbeit bestand in der Weiterentwicklung und Erprobung einer Nässesonde zur Messung von Tropfengrößen und -anzahlen in einer Niederdruckdampfturbine. Ein zuverlässiger Einsatz der Sonde konnte durch unterschiedliche Maßnahmen sichergestellt werden. Die Eignung von numerischen Modellen wurde anhand von Düsen- und Kaskadenströmungen verifiziert. Schließlich konnten Methoden zur Analyse der durch Kondensation entstehenden Verluste erarbeitet und auf Dampfturbinen angewendet werden.

4.4 GT: Turbokomponenten für Gasturbinen

Heinz Knittel, MTU Aero Engines GmbH, München

Gasturbinen spielen eine essentielle Rolle bei der Elektrizitätsversorgung mit weiter steigendem Anteil, sowohl in großtechnisch realisierten Kraftwerksprozessen (Kombikraftwerken zusammen mit Dampfturbinen), in offenen Prozessen zur Deckung von Leistungsspitzen oder als komplementäres Element zusammen mit regenerativen Elementen wie z.B. Solar- und Windkraft. Sie können mit allen flüssigen und gasförmigen Brennstoffen betrieben werden.

Die Turbokomponenten für Gasturbinen können direkt und indirekt entscheidende Beiträge zur Erreichung der KW21-Ziele leisten – zur Steigerung des Wirkungsgrads, Verbesserung der Umweltfreundlichkeit und weitere Erhöhung der Zuverlässigkeit im Kraftwerksbetrieb. Die nachfolgend dargestellten Teilprojekte waren, auf diese Ziele ausgerichtet, den Schwerpunkten Optimierte Turbokomponenten, Wärmeübergangsverhalten, Hochleistungswerkstoffe und Gasturbinen Überwachung zugeordnet.

BY 10GT: Untersuchungen zum Einfluss der Dünnwandigkeit auf die mechanischen Hochtemperatureigenschaften verschiedener Nickelbasis-Superlegierungen

Primäres Ziel des Teilprojektes war die Formulierung der quantitativen Zusammenhänge zwischen Wandstärke einer gekühlten Turbinenschaufel und ihrer spezifischen Eigenschaften wie Lebensdauer, Kriech- und Oxidationsbeständigkeit.

In diesem Zusammenhang wurde das Kriech- und Oxidationsverhalten ausgewählter Nickelbasis-Superlegierungen in Abhängigkeit der Wandstärke experimentell untersucht und bewertet. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen, wurde ein Materialmodell formuliert. Dieses ermöglichte die Berechnung der Kriecheigenschaften dünner Strukturen in oxidierender Atmosphäre. Hierdurch konnten spezifische Aussagen zur minimalen Schaufelwandstärke, Lebensdauer und der gezielten Legierungsauswahl gegeben werden.

Ein weiteres Projektziel war die Evaluierung der bestehenden Feingusstechnologien und deren Weiterentwicklung, um geringere Wandstärken als bisher gießen zu können.



BY 11GT: Erhöhung von Effizienz und Sicherheit von Gasturbinen durch besser gießbare Werkstoffe

Bei der Erstarrung von Nickelbasis-Superlegierungen treten bei manchen Werkstoffen Korngrenzenrisse auf. Dies verhindert den Einsatz von Legierungen mit ansonsten überlegenen technologischen Eigenschaften für die Produktion von innengekühlten Turbinenschaufeln.

In diesem Vorhaben wurde der Einfluss von korngrenzenaktiven Elementen wie Bor, Zirkon und Kohlenstoff auf die Rissneigung der Superlegierung IN100 untersucht. Die Superlegierung IN100 zeichnet sich durch eine geringe Dichte aus.

Durch gezielte Einstellung der Minorelemente konnten rissfreie Derivate abgeleitet werden, was jedoch nicht mit den klassischen Erstarrungsrissmodellen erklärt werden konnte. Die Elemente unterscheiden sich in ihren Auswirkungen auf die thermophysikalischen Eigenschaften der teigigen Zone: Kohlenstoff führt dazu, dass die Schmelze bei der Erstarrung eher in isolierten Taschen vorliegt statt einen Flüssigfilm auszubilden. Bei Bor wurde eine erhöhte Duktilität bei hohen Temperaturen festgestellt. Für Zirkon liegen keine Hinweise auf die Verbesserung der Gießbarkeit vor.

Die unterschiedlichen Effekte der Minorelemente steuern die Dehnungen und Dehnraten am Ende der Erstarrung, wenn dünne Schmelzefilme die mechanischen Eigenschaften der dendritischen Struktur herabsetzen.

BY 12GT: Computergestützte Bauweisenoptimierung moderner Turbokomponenten im Gasturbinenbau

Wichtige Zielgrößen bei der Optimierung von Turboverdichtern im Gasturbinenbau sind Kosten und Effizienz. Dabei spielt vor allem die Spaltauslegung zwischen rotierenden und feststehenden Bauteilen eine wesentliche Rolle. Um die Baulänge des Verdichters gering zu halten, müssen Axialspalte eng dimensioniert werden.

Zum anderen sind möglichst enge Schaufelspitzenspalte notwendig, um einen hohen Wirkungsgrad und einen ausreichenden Pumpgrenzenabstand sicherstellen zu können. Im Rahmen des Vorhabens konnten Template-Simulationsmodelle zur Vorhersage der Häufigkeitsverteilung von Axialspalten bereitgestellt werden. Mittels Sensitivitätsanalysen und Parameterstudien wurde ein geeigneter Detaillierungsgrad der Analysemodelle festgelegt. Zudem konnte der Einfluss konstruktiver Parameter von turbomaschinenspezifischen Bauweisen auf die Spaltweiten identifiziert werden. Ein "Bauweisenkatalog" bildet die Datenbasis der statistischen Toleranzanalyse. Zur Vorhersage des transienten Schaufelspitzenspaltes wurde ein automatisiertes FE-Simulationstool entwickelt. Mithilfe des entwickelten Modells kann das radiale Spaltverhalten frühzeitig bewerten werden und somit in konzeptionelle Überlegungen einfließen.



BW L 36GT: Optimierung von Axialdiffusoren in Gasturbinen für GuD-Anlagen

Zur numerischen Berechnung der Strömung in einem Axialdiffusorversuchsstand sollten in einem ersten Schritt geeignete CFD-Modelle gefunden werden. Dazu wurden die Einflüsse von Rechengebiet, Rechengitter, Turbulenzmodell und Randbedingungen untersucht. Mit einem geeigneten CFD-Modell wurde die Gehäuse- und Nabengeometrie entsprechend variiert, um den Druckrückgewinn zu maximieren. Dies wurde anhand von drei repräsentativen Betriebspunkten durchgeführt. Es wurde eine Geometrie gefunden, die in allen Betriebspunkten eine Erhöhung des Druckrückgewinns ergibt. Dabei konnte der Druckrückgewinn abhängig vom Betriebspunkt um 1 bis 7 Prozentpunkte erhöht werden. Dies macht deutlich, dass eine Geometrie-Optimierung nicht allgemeingültig sein kann, sondern sehr stark vom Betriebspunkt der Turbine abhängig ist.

BW L 37GT: Prognose des Leistungsverhaltens von Gasturbinen auf Basis einer selbstadaptierenden Alterungsmodellierung

Während des Betriebs reduziert sich die Leistungsfähigkeit von Gasturbinen aufgrund von alterungsbedingten Mechanismen. Durch Wartungsmaßnahmen kann die ursprüngliche Leistungsfähigkeit wiederhergestellt werden. Die Erstellung individueller Wartungspläne ermöglicht hierbei die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit der Gasturbinenanlagen. Die Voraussetzung dafür ist jedoch ein Überwachungssystem, welches den Zustand einer Gasturbine zuverlässig diagnostizieren und prognostizieren kann. Ziel des Projektes BW L 37GT war die Entwicklung eines Verfahrens, welches die Alterung der realen Gasturbine nachbildet und das Gasturbinenmodell kontinuierlich anpasst. Hierdurch können alterungsbedingte Änderungen des Betriebsverhaltens erfasst werden, was eine genauere Diagnose sowie Prognose des Leistungsverhaltens ermöglicht.

BW L 39GT: Inverse Messmethodiken zur Bestimmung des lokalen Wärmeüberganges bei innen gekühlten Gasturbinenbauteilen

Im Rahmen dieses Projektes aus dem Arbeitsbereich der Turbokomponenten für Gasturbinen (GT) der Forschungsinitiative "KW21" wurde ein Messverfahren zur Bestimmung der kühlseitigen Wärmeübergangseigenschaften realer Gasturbinenbauteile entwickelt und erprobt.

Hierbei wurden innerhalb einer Optimierungsroutine hochauflösende Messtechniken mit einer effizienten Finite-Elemente-Methode gekoppelt. Durch die Verwendung geeigneter Filtertechniken wurde die Genauigkeit der experimentellen Daten sichergestellt, die bei der Verwendung von inversen Methoden notwendig ist.

Die Kopplung mit dem numerischen Verfahren ermöglicht darüber hinaus die Berücksichtigung dreidimensionaler Wärmeleitungseffekte im Bauteil sowie die Bestimmung des thermischen Wärmeaustausches mit der Kühlluftströmung während der transienten Versuchsdurchführung.



BW L 41GT: Formoptimierung neuartiger, kompakter Labyrinthdichtungen zur Leckagereduktion in Turbomaschinen

Bisher verwendete Auslegungsmethoden für Labyrinthdichtungen in Gas- und Dampfturbinen eignen sich nur schlecht für neuartige kompakte Dichtungsgeometrien. In diesem Projekt wurde daher ein erweitertes Formoptimierungswerkzeug entwickelt, das sich zur Auslegung einer Vielzahl unterschiedlicher Geometrien eignet. Neben der Optimierung für den Neuzustand können durch moderne Mehrziel-Optimierungsalgorithmen nun erstmals auch gegen Alterung und Verschleiß robuste Labyrinthdichtungen generiert werden.

Die Optimierung stützt sich dabei auf Modelle, die mittels Methoden des maschinellen Lernens auf Grundlage einer umfangreichen Datenbank gebildet wurden. In Bereichen, in denen die Modellgenauigkeit nicht ausreicht, wird auf numerische Simulationen auf Basis des OpenSource-Gleichungslösers OpenFOAM zurückgegriffen, für die im Rahmen dieses Projektes automatisierte Abläufe entwickelt und implementiert wurden.

4.5 GV: Brennkammern für Gasturbinen

Armin Schimkat, ALSTOM Power GmbH, Mannheim

Einen der beiden Schwerpunkte im Arbeitskreis Brennkammern für Gasturbinen bildet der Themenbereich Wirkungsgradsteigerung, Brennstoffflexibilität und Emissionsminderung mit den Projekten BW L 42GV, BY 17GV und BY 18GV. Um den Wirkungsgrad des GuD-Kraftwerks anzuheben, soll der Einsatzbereich von Gasturbinenbrennkammern auf erhöhte Turbineneintrittstemperaturen ausgedehnt werden. Zu liefernde Brennerdaten, thermodynamische Zusammenhänge, Auslegungsprinzipien und Betriebsparameter müssen für die zu entwickelnden Brennkammerkonzepte eng aufeinander abgestimmt werden. Gleichzeitig sind die Emissionswerte zu minimieren und die Brennstoffflexibilität zu maximieren.

Der zweite Schwerpunkt liegt im Themenbereich Verbrennungssimulation, Thermoakustik und Flammenstabilität mit den Vorhaben BW L 43GV, BW L 44GV, BY 13GV, BY 14GV, BY 15GV und BY 16GV. Durch Schwankungen in der Wärmefreisetzung beim Verbrennungsprozess entstehen Druckänderungen im Verbrennungsraum, die sich bei bestimmten Frequenzen zu Pulsationen mit zerstörerischer Wirkung verstärken können. Dieses Themenfeld wird übergreifend als Thermoakustik bezeichnet. Sowohl die Weiterentwicklung von Verbrennungssystemen hin zu hohen Temperaturen und Drücken als auch die Erweiterung der Brennstoffflexibilität wird durch thermoakustisch induzierte Verbrennungsschwingungen eingeschränkt. Deshalb ist die Verbesserung der thermoakustischen Auslegungsverfahren und Testmethoden entscheidend für neue brennstoffflexible Gasturbinenbrennkammern. Da insbesondere magere und schadstoffarme Verbrennungssysteme zu Verbrennungsinstabilitäten neigen, ist zur Erweiterung der Flammenstabilität von zukünftigen Gasturbinen eine verbesserte Vorhersage der thermoakustischen Stabilität nötig. Dies gilt vor allem für den Betrieb bei Teillast.



BY 13GV: Hochfrequente Instabilitäten der Verbrennung mit Selbstzündung

Im Teilprojekt BY 13GV wurde die thermoakustische Stabilität von Verbrennungsprozessen untersucht, bei denen die Stabilisierung der Flamme durch Selbstzündung erfolgt. Dies ist von großem Interesse für die Entwicklung zukünftiger Gasturbinen, da neue Technologietrends zu einer erhöhten Relevanz von Selbstzündeffekten führen.

Ziel war es, die physikalischen Wechselwirkungsmechanismen zu identifizieren, die zum Auftreten hochfrequenter Schwingungen in Selbstzündflammen führen können. Die Studie erfolgte anhand numerischer Simulationsmethoden, die für diese Anwendung weiterentwickelt wurden und auch bereits beim Industriepartner im Einsatz sind.

Im Projektverlauf wurden mehrere Wechselwirkungsmechanismen untersucht, mittels reaktionskinetischer Berechnungen, sowie kompressiblen Grobstruktursimulationen. Damit konnten die verschiedenen Beiträge zum thermoakustischen Quellterm erfolgreich berechnet werden, die eine fallspezifische Aussage bezüglich des maßgeblichen Wechselwirkungsmechanismus ermöglichen. Darüber hinaus konnten analytische Modelle für einen Teil der Mechanismen erstellt werden, die in Zukunft verbreitet für Stabilitätsvorhersagen verwendet werden sollen.

BY 14GV: Flammendynamik bei der Verbrennung von Flüssigbrennstoffen

Die schadstoffarme Verbrennung von Flüssigbrennstoffen (meist Öl) in stationären Gasturbinen stellt sowohl hinsichtlich der Emissionen als auch der thermo-akustischen Stabilität eine große Herausforderung dar. Eine zuverlässige Vorhersage bzw. Kontrolle der thermo-akustischen Instabilitäten in den frühen Stadien des Design-Prozesses ist bei der Sprayverbrennung von größter Wichtigkeit.

Ziel des Teilprojektes BY 14GV war es einen Beitrag zu leisten, die hierzu nötigen Kenntnisse und Simulationswerkzeuge aufzubauen. Dazu wurde ein Modell zur Beschreibung der polydispersen, isothermen Sprayausbreitung in einer Industrie-relevanten Konfiguration Mithilfe von Grobstruktursimulation validiert. Des Weiteren wurden relevante Modelle und Gleichungen zur Beschreibung der Sprayverdampfung in den CFD-Löser implementiert und ebenfalls anhand eines verdunstenden Sprayjets validiert. Abschließende Arbeiten zur Verbrennungsmodellierung komplettieren die zur Simulation der Sprayverbrennung nötigen Methoden.

Die entwickelten Simulationswerkzeuge bieten nun die Voraussetzungen entsprechende Methoden zur Untersuchung der Spray-Akustik Wechselwirkung einzubinden und somit langfristig der Entwicklung emissionsarmer, "trockener" Ölverbrennungstechnologien zu dienen.



BY 15GV: Einfluss neuer, brennstoffflexibler Vormischbrenner auf die thermoakustischen Eigenschaften von Ringbrennkammern

Das Ziel des Projektes war die Erarbeitung einer Vorhersagemethode zur Bestimmung eines thermoakustisch stabilen Brennerdesigns in einem gegebenen Betriebsbereich für Ringbrennkammern.

Dazu wurde ein modularer Brenner entwickelt, der durch Variation von Geometrieparametern zur Ausbildung von deutlich unterschiedlichen Flammeneigenschaften führt. Durch experimentelle Untersuchungen im Einzelbrennerversuchsstand wurden die Brenner- und Flammeneigenschaften in Form von Brennertransfermatrizen und Flammentransferfunktionen bestimmt. Jeweils ein parametrisiertes Modell für den Brenner und die Flamme ermöglichen aufgrund der direkten Abhängigkeit der Modellparameter von den Geometrieparametern die Berechnung von Brenner- und Flammeneigenschaften im gegebenen geometrischen Bereich. Stabilitätsanalysen an dem Netzwerkmodell der Ringbrennkammer mit dem implementierten Brenner- und Flammenmodell liefern ein optimales Brennerdesign, dessen thermoakustische Stabilität und die Sensibilität gegenüber Luftzahl- und Leistungsschwankungen durch Dämpfungsmessungen validiert wird.

BY 16GV: Experimentelle Untersuchung und Modellierung von selbstzündungsgetriebenen Transversalmoden in Gasturbinenbrennkammern mit hoher Oxidatorvorheizung

Ziel des Vorhabens war die wissenschaftliche Analyse von hochfrequenten thermoakustischen Instabilitäten – in der Vergangenheit lag der Fokus der Forschung fast ausschließlich auf niederfrequenten Schwingungen – und die Identifikation von Einflussfaktoren sowie die Modellierung der entsprechenden Phänomene. Dazu war das Vorhaben in zwei experimentelle Ansätze mit unterschiedlichem Schwerpunkt aufgeteilt. Zum einen wurden selbsterregte hochfrequente Instabilitäten bei atmosphärischen Bedingungen untersucht, zum anderen wurde mit externer Anregung unter Druck gearbeitet.

In einem atmosphärischen Einzelbrenner-Prüfstand mit eingebautem Drallbrenner wurden das Druckfeld, das Geschwindigkeitsfeld sowie das Chemilumineszenzsignal gemessen. In der Brennkammer tritt unter verschiedensten Betriebsbedingungen bei etwa 3 kHz eine selbsterregte Transversalmode auf. In den Aufnahmen der Mie-Streuung erkennt man neben dem periodischen Einschluss von Verbrennungsprodukten in das Frischgas, der mit Hilfe der Geschwindigkeitsfelder auf die Interaktion von Akustik und Hauptströmung zurückgeführt werden konnte, eine periodische – durch die akustische Schnelle induzierte – Auslenkung der Flamme. Die Zeitreihen von Chemilumineszenz- und Drucksignal visualisieren eindrucksvoll das Rayleigh-Kriterium, also die konstruktive Interferenz von Druckschwankung und Wärmefreisetzung. Die Wechselwirkung wurde mit einem physikalisch-motivierten analytischen Modell beschrieben. Das Modell veranschaulicht den zugrundeliegenden Mechanismus und ermöglicht eine quantitative Abschätzung des Phänomens.

Die Versuche mit externer Anregung unter Druck für die "Jet in Crossflow"-Konfiguration dienten der Validierung des Feedback-Mechanismus. Flammenform, Strömung und Betriebsbedingungen unterscheiden sich signifikant von den atmosphärischen Versuchen.



BY 17GV: Emissionsverminderung bei der Effizienz- und Leistungserhöhung von Gasturbinen

Im Rahmen von Modernisierungsmaßnahmen von stationären Gasturbinen sollten die Stickoxidemissionen durch eine Verbesserung der feinskaligen Mischung am Brenneraustritt mittels Verlängerung des Mischungspfades reduziert sowie der destabilisierende Einfluss der Primärzonenkühlluft auf die Verbrennungsstabilität von Mehrbrennersystemen untersucht werden. Der bisher beim Industriepartner eingesetzte Drallerzeuger wurde modifiziert und die numerische Auslegung der Aerodynamik im Wasserkanal durch optische Untersuchungen validiert. Basierend auf der numerischen Vorauslegung der Gasbelochung wurde die höhere Mischungsqualität des entwickelten Prototypbrenners durch einen Vergleich mit dem Vorgängermodell mittels Mischungsstudien im Wasserkanal bestätigt. Im weitgehend neu aufgebauten atmosphärischen Verbrennungsversuchsstand konnte ein stabiles Flammenverhalten bei reduzierten Emissionen erreicht werden. Das Einmischverhalten der Kühlluft in die äußere Scherschicht der Strömung wurde im Wasserkanal untersucht und die Auswirkung von unterschiedlichen Kühlluftmengen auf Emissionen und akustische Stabilität mit optionaler Anregung im Verbrennungsversuchsstand aetestet, Abschließend wurde eine numerische Studie zur Aerodynamik und Mischung der Mehrbrenneranordnung durchgeführt.

BY 18GV: Brennstoffflexibles Gasanalysekonzept

Aufgrund der zunehmenden Verknappung fossiler Brennstoffe werden auch alternative Brennstoffe wie z. B. Synthesegasen oder Kokereigasen im Kraftwerksbereich eingesetzt. Die Zusammensetzung dieser Gase unterliegt allerdings enormen Schwankungen, wodurch eine kontrollierte Prozesssteuerung stark beeinträchtigt wird. Ziel des Projekts war die Entwicklung eines kompakten innovativen Messsystems auf der Grundlage der Laser-Ramanspektroskopie, welches in der Lage ist, die Gaszusammensetzung verschiedenster gasförmiger Brennstoffe schnell und online zu bestimmen. Die Aufgaben im Rahmen dieses Projekts waren die Planung und der Aufbau eines Sensorkonzeptes sowie die Überprüfung der Einsetzbarkeit. Das Sensorkonzept wurde mit dem Schwerpunkt auf Genauigkeit, Einfluss von Temperatur- und Druckschwankungen und Langzeitstabilität umfassend charakterisiert. Die entwickelte Software ermöglicht Analysegeschwindigkeit von weniger als einer Sekunde und erlaubt auch die Analyse von Gaskomponenten wie z. B. H_a und CO die typisch für alternative Brennstoffe sind. Die Einsetzbarkeit vor Ort wurde an unterschiedlichen Messstellen einer Biogasanlage demonstriert. Die Messwerte wurden, soweit möglich, mit Ergebnissen aus konventionellen Messtechniken verglichen und zeigten aute Übereinstimmung. Somit konnten alle im Teilprojekt enthaltenen Projektziele uneingeschränkt erreicht und das Projekt erfolgreich abgeschlossen werden.



BW L 43GV: Hybrid LES/RANS-Simulation von Gasturbinen-Brennkammersystemen

In dem vorliegenden Forschungsprojekt wurde die Leistungsfähigkeit von unterschiedlichen Verbrennungsmodellen in Kombination mit LES/RANS-Methoden untersucht. Dabei wurden insbesondere zwei für die moderne Gasturbinenverbrennung repräsentative Testfälle nachgerechnet, bei denen instationäre Prozesse in Form von thermoakustischen Schwingungen oder strömungsmechanischen kohärenten Strukturen eine wichtige Rolle spielen.

Als Testfälle wurden hier eine Labordrallflamme nahe der mageren Verlöschgrenze und die magere Vormischflamme hinter einem industriellen Drallbrenner ausgewählt. Es wurden detaillierte Vergleiche von Mess- und Simulationsdaten durchgeführt. Die Rechenläufe ergaben nach einer Parameteroptimierung des 3-Schritt-Reaktionsmechanismus, der im Verbrennungsmodell verwendet wurde, eine sehr gute Übereinstimmung von Rechen- und Messwerten. Die Untersuchungen in einem parallel bearbeiteten Projekt hingegen zeigten, dass dieses Ergebnis nicht verallgemeinert werden darf.

BW L 44GV: Theoretische Erfassung der Abhebehöhe (Lift-Off Height, LOH) von Strahlflammen bei Druckverbrennung

Bei dem HSB (High Strain Burner) Konzept wird ein Brennstoffstrahl mit einem sehr hohen Impuls in einen heißen Abgasstrom eingedüst. Durch die extrem hohen Geschwindigkeiten kann sich die Flamme erst in einem gewissen Abstand (Abhebehöhe) vom Düsenaustritt stabilisieren. Bis zum Stabilisierungspunkt hat der Strahl so viel Masse angesaugt, dass die Verbrennung unter mageren Bedingungen und deswegen mit sehr niedrigen NO_x-Emissionen abläuft. Da die Abhebehöhe das Emissionsverhalten des Konzeptes steuert, war das Ziel des Projektes die Abhängigkeit derselben von den thermodynamischen und strömungsmechanischen Bedingungen durch 3D-Modellierung wiederzugeben.

Um das Ziel zu erreichen, wurde ein Modell zur Beschreibung der Wechselwirkung zwischen Wärmefreisetzung und Turbulenz basierend auf der gemeinsamen Wahrscheinleichkeitsdichteverteilung (Joint Probability Density Function JPDF) von Reaktionsfortschritt und Mischungsbruch entwickelt. Die Form der JPDF wird dabei durch den Mittelwert und den Schwankungswert der genannten Parameter festgelegt. Zu diesem Zweck müssen Transportgleichungen für Mittelwert und Varianz von Mischungsbruch und Reaktionsfortschritt gelöst werden. Die Berechnung einer, in der Literatur sehr gut dokumentierten, abgehoben brennenden Flammen zeigte, dass das entwickelte JPDF Modell ohne die Einbeziehung von zusätzlichen empirischen Koeffizienten die Abhebehöhe sehr genau wiedergibt. Anschließend wurde die Abhebehöhe für ein HSB Konzept, das innerhalb KW21 entwickelt wurde, für unterschiedliche thermodynamische und strömungsmechanische Bedingungen berechnet. Die Wiedergabe des Verhaltens der realen Flamme durch die Berechnung zeigt, dass das entwickelte Modell für die Entwicklung von Brennern nach dem Konzept der abgehobenen Verbrennungsführung herangezogen werden kann.



E Arbeitskreis Energiewirtschaft Owe Jönsson, E.ON SE, Düsseldorf

- BY 1E: Integration und Bewertung erzeuger- und verbraucherseitiger Energiespeicher
- BY 2E: Einsatzmöglichkeiten von Elektrostraßenfahrzeugen zum Lastmanagement
- BY 3 E: Simulationsgestützte Prognose des elektrischen Lastverhaltens bis 2030
- BW L 21E: Modell zur Portfolioauswahl in der Elektrizitätswirtschaft Entwicklung eines Modells zur Bestimmung optimaler Erzeugungsportfolios zur Gewährleistung der langfristigen Versorgungssicherheit
- BW W 21E: Investitionsentscheidungen zur optimalen Risikodiversifikation von Kraftwerksbetreibern – Erweiterung und Anwendung der Portfoliotheorie auf die Anforderungen von Energieversorgungsunternehmen
- BW L 22E: Entwicklung eines Modellansatzes zur integrierten Analyse von Erdgasbereitstellung, Erdgastransport und Erdgasverbrauch in Europa
- BW W 22E: Perspektiven der Stromerzeugung aus Erdgas im Rahmen der europäischen Erdgasversorgung



Arbeitskreis Energiewirtschaft

Projekt: BY 1E

Integration und Bewertung erzeuger- und verbraucherseitiger Energiespeicher

Projektleiter:	Prof. DrIng. Ulrich Wagner Prof. Dr. rer. nat. Thomas Hamacher Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik Technische Universität München
Mitarbeiter:	DiplIng. Philipp Kuhn DiplIng. Maximilian Kühne DiplIng. Christian Heilek
Finanzierung:	Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst
	Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie
	E.ON Energie AG

1 Ausgangssituation

Die Einführung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes führte in Deutschland zuletzt zu einem massiven Zubau von Anlagen zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien (EE). Die Integration hoher Anteile angebotsabhängiger Erzeugung wird eine Flexibilisierung des Stromsystems erfordern. Gleichzeitig wird die von den konventionellen thermischen Kraftwerken zu deckende residuale Last sukzessive abnehmen, was zu einer deutlichen Verringerung der Ausnutzungsdauern führen wird. Die Integration der Einspeisung aus EE und Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) stellt eine zunehmende Herausforderung dar und könnte einen Ausbau der Speicherkapazitäten sinnvoll erscheinen lassen. So ermöglichen Speicher eine zeitliche Entkopplung von Stromerzeugung und -verbrauch, was zudem zu einer Kostenreduktion führen kann. Des Weiteren können Speicher durch die Substitution konventioneller Kraftwerksleistung, die Bereitstellung von Reserveleistung sowie durch eine eventuelle Vermeidung von Netzausbaumaßnahmen die Kosten des Stromsystems reduzieren. Doch auch die verbraucherseitige Energiespeicherung stellt eine Möglichkeit zur Flexibilisierung dar. Insbesondere bei Systemen mit thermischen Speichern ist Lastmanagement ohne entscheidende Einschränkungen für den Nutzer

Integration und Bewertung erzeuger- und verbraucherseitiger Energiespeicher



möglich. Sowohl erzeuger- als auch verbraucherseitige Speicher könnten zukünftig einen Beitrag zur notwendigen Flexibilisierung des Stromsystems und somit zur Integration wachsender Anteile fluktuierender Erzeugung leisten. Allerdings stellt sich die Frage, welche der unterschiedlichen Technologien diese Aufgabe am wirtschaftlichsten erfüllen und in welchem Umfang ein Ausbau der Kapazitäten erforderlich ist. Aufgrund der Wechselwirkungen zwischen erzeugerseitiger Speicherung und Lastmanagement sowie deren Rückwirkungen auf Investitionsentscheidungen im thermischen Kraftwerkspark kann diese Frage nur mithilfe eines möglichst umfassenden Stromsystemmodells gelöst werden.

Um mit einem solchen Modell die optimale Struktur des Stromerzeugungssystems eines ganzen Landes zu bestimmen, ist eine volkswirtschaftliche Modellierung zu verwenden. Im Gegensatz zu einem betriebswirtschaftlichen Ansatz liegt das Optimierungsziel nicht in der Gewinnmaximierung einzelner Akteure, sondern in der Maximierung der ökonomischen Wohlfahrt und damit vereinfacht in der Minimierung der Gesamtkosten. Entscheidungen über Speicherinvestitionen können nur auf Basis einer wirtschaftlich getriebenen Speichereinsatzplanung getroffen werden. Der Speichereinsatz nutzt zur Reduktion der Gesamtkosten die nachfragebedingt schwankenden Erzeugungskosten. Er hängt somit wiederum stark von der residualen Last sowie von Einsatz und Kostenstruktur der konventionellen Bestands- und Neubaukraftwerke ab. Da es sich bei Kraftwerken und großtechnischen Speichern um langlebige und vergleichsweise teure Investitionsgüter handelt, müssen die für eine Amortisation notwendigen langen Zeiträume von einigen Jahrzehnten auch im Modell abgebildet werden. Zugleich kann die Flexibilisierung des Stromsystems durch den Einsatz von Speichern nur mithilfe einer ausreichend hohen zeitlichen Auflösung modelliert werden. Aufgrund der Modellgröße und der hohen Komplexität der Speicherung ist die Verwendung eines mathematischen Optimierungsverfahrens zur Lösung der Problemstellung unumgänglich.

Zur Beantwortung der vielfältigen Fragestellungen, wie sie in der Energiewirtschaft auftreten, wurde in der Vergangenheit eine Vielzahl unterschiedlicher Modelle entwickelt. Optimierungsmodellen zur Kraftwerkseinsatzplanung liegt meist ein Zeitraum von maximal einem Jahr zugrunde, in dem der Einsatz des Kraftwerksbestands optimiert werden soll. Derartige Modelle weisen eine hohe zeitliche Auflösung sowie einen hohen Detaillierungsgrad bei der technischen Modellierung auf. Soll das Stromsystem über einen langfristigen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten betrachtet werden, müssen zusätzlich zur Einsatzplanung des Kraftwerksbestandes auch Entscheidungen über Neuinvestitionen getroffen werden. In diesem Fall würde eine Modellierung mit hoher zeitlicher und technischer Genauigkeit zu Modellgrößen führen, die eine Optimierung mit derzeit üblichen Rechenleistungen unmöglich machen. Aus diesem Grund greifen bisherige Modellierungsansätze zur Kraftwerkseinsatz- und Ausbauplanung auf diverse Vereinfachungen zurück, wie z. B. repräsentative Stützjahre oder Typtage.



2 Projektziele

2.1 Projektziele

Die Wechselwirkungen zwischen großtechnischer Energiespeicherung und Lastmanagement sowie deren Rückwirkungen auf Investitionsentscheidungen im thermischen Kraftwerkspark sind noch nicht ausreichend erforscht. Ziel dieses Teilprojekts ist es deshalb, ein Modell des deutschen Stromsystems zu entwickeln, das eine Optimierung des Einsatzes und Ausbaus von Kraftwerken und Speichern erlaubt und damit die Quantifizierung des volkswirtschaftlich sinnvollen Potentials großtechnischer Speichertechnologien unter Berücksichtigung technischer und energiewirtschaftlicher Rahmenbedingungen ermöglicht. Zudem soll der Einfluss einer in Zukunft denkbaren verstärkten Nutzung sogenannter funktionaler Speicher [20] auf das volkswirtschaftliche Potential großtechnischer Speicher bestimmt werden. Als funktionale Speicher werden neben verbraucherseitigen Speichern auch Elektrofahrzeuge sowie der Stromexport betrachtet. Anhand diverser Szenarios wird das volkswirtschaftliche Energiespeicherpotential im Zeitraum bis 2050 ermittelt, wobei u. a. die Stromnachfrageentwicklung, der Anteil EE und die Verfügbarkeit funktionaler Speicher variiert werden.

2.2 Umsetzung der Hinweise aus den bisherigen Begutachtungen

Entsprechend dem Hinweis aus der Zwischenbegutachtung, dass aufgrund des für jedes Jahr unabhängigen Zubaus an Speichern (Grüne-Wiese-Ansatz) Oszillationen in der Speicherdimensionierung auftreten können, wurde das Modell um die Option erweitert, dass einmal getätigte Investitionen in großtechnische Speicher für die Folgejahre erhalten bleiben. Das Ergebnis daraus wird in Kapitel 5.5 dargestellt.

Anhand zweier geeigneter Anwendungen wurde Demand Side Management im Modell implementiert, um Rückwirkungen auf das großtechnische Speicherpotential auszumachen. Ebenso wurde das Vehicle-to-Grid-Konzept (V2G) eingebunden, um entsprechende Auswirkungen analysieren zu können. Im Rahmen dessen wurden die Kooperationen mit den Teilprojekten BY 2E und BY 3E intensiviert. Die Ergebnisse dieser weiterführenden Untersuchungen werden in Kapitel 5.4 gezeigt.

Abhängig von den Rahmenbedingungen der Szenarios wurde untersucht, in welchem Ausmaß die jeweiligen großtechnischen Speichertechnologien wirtschaftlich werden. Die Ergebnisse hierzu sind im ausführlichen Abschlussbericht [9] zu finden.

3 Vernetzung

3.1 Vernetzung innerhalb KW21

Im Rahmen des Forschungsprojektes KW21 gab es innerhalb des Arbeitskreises Energiewirtschaft regelmäßigen Austausch von Daten und Informationen. Während im Arbeitskreis insbesondere Rahmendaten wie Ausbauziele der EE sowie technische und wirtschaftliche Parameter abgestimmt wurden, erfolgte ein sehr intensiver Austausch mit den Teilprojekten BY 2E und BY 3E. Aus dem Projekt BY 2E "Elektrostraßenfahrzeuge zum Lastmanagement" [23] stammen technische Daten zu den berücksichtigten Elektrofahrzeugen und die dazugehörigen Fahrprofile. Im Gegenzug wurden zur Bestimmung von



Rückwirkungen von Ladestrategien auf den Kraftwerkseinsatz in BY 2E Simulationen mit dem entwickelten Modell IMAKUS durchgeführt. Aus dem Teilprojekt BY 3E [21] stammt ein kohärenter Datensatz von Charakteristiken der Last und der fluktuierenden Einspeisung aus EE und KWK, die als Eingangsgröße im Teilprojekt BY 1E notwendig waren. Die zugehörigen Daten zum Temperaturverlauf entstammen ebenso dem Teilprojekt BY 3E.

3.2 Vernetzung außerhalb KW21

Mit dem Projekt "Integration of Renewable Electricity Generation" an der International Graduate School of Science and Engineering (IGSSE) fand ein Erfahrungsaustausch über Methoden der Energiesystemmodellierung statt.

4 Vorgehensweise und Methodik

Zur Bestimmung des volkswirtschaftlich sinnvollen Potentials großtechnischer erzeugerseitiger Speicher in Deutschland wurde ein Modell des deutschen Stromsystems entwickelt, das eine Optimierung des Einsatzes und Ausbaus von konventionellen Kraftwerken und Speichern erlaubt [9]. Mit dem Ziel, die Stromnachfrage zu volkswirtschaftlich minimalen Kosten zu decken, bestimmt das Modell – ausgehend vom Bestand – den Ausbau der Kraftwerke und Speicher im Hinblick auf Technologie, Leistung, Kapazität und Bauzeitpunkt. Die Erzeugung aus EE und KWK wird dabei für den Betrachtungszeitraum vorgegeben und aufgrund der vorrangigen Einspeisung von der Stromnachfrage abgezogen. Nur die residuale Last ist für den Einsatz der konventionellen Kraftwerke und Speicher relevant. Prinzipiell wäre eine geschlossene Lösung der gesamten Optimierungsaufgabe wünschenswert. Jedoch würde dies bei der Betrachtung mehrerer Jahrzehnte in Stundenauflösung zu einer Modellgröße führen, die mit den Möglichkeiten der Computertechnik nicht oder zumindest nicht mit akzeptablem Zeitaufwand bewältigt werden kann. Da sowohl ein gröberes Zeitraster als auch eine Verwendung von Typtagen die Abbildung der Flexibilisierungseffekte von Speichern einschränken würden, stellt die Reduktion der Zeitpunkte hier keine geeignete Option zur Verringerung der Problemgröße dar. Stattdessen wird die Optimierungsaufgabe in kleinere, einfacher zu lösende Teilprobleme zerlegt. Eine Möglichkeit zur Aufteilung besteht darin, den Kraftwerksausbau zunächst ohne Berücksichtigung von Speichern zu bestimmen. Da die durch den Speichereinsatz bewirkte Lastglättung zu einer höheren Auslastung von Grundlast- und zu einer niedrigeren Auslastung von Spitzenlastkraftwerken führt, werden Investitionsentscheidungen in Kraftwerke durch die Existenz von Speichern im Allgemeinen bestärkt. Durch ein iteratives Verfahren kann der Einfluss der Speicherung nachträglich berücksichtigt und der Kraftwerksausbau entsprechend korrigiert werden. Netzrestriktionen werden nicht modelliert. Stattdessen wird von einer größtmöglichen Flexibilität durch eine ideal ausgebaute Netzinfrastruktur ausgegangen. Eine Bereitstellung von Reserveenergie durch Kraftwerke und Speicher wird nicht betrachtet. Die Bestimmung der notwendigen gesicherten Leistung trägt jedoch der Versorgungssicherheit Rechnung.

Optional kann auch der Einsatz funktionaler Speicher, im konkreten Fall Elektrofahrzeuge, DSM-Anwendungen und Export, in die Optimierung der Strombereitstellung einbezogen werden. Funktionale Speicher stellen hierbei einen verbraucherseitigen Speicher bzw. eine flexible Last dar. Durch die Vorgabe möglicher technischer Potentiale der funktionalen Speicher wird untersucht, welchen Beitrag sie zur Integration EE leisten und in wel-



chem Umfang sie das wirtschaftliche Potential großtechnischer Speicher reduzieren könnten.

5 Projektergebnisse und Ausblick

5.1 Modellkonzept

Auf Basis des im vorherigen Kapitel beschriebenen Lösungsansatzes wurde ein iteratives und hybrides Modell zur wirtschaftlichen Optimierung des Kraftwerks- und Speicherausbaus entwickelt. Grundsätzliches Ziel des Modells ist die Deckung der Stromnachfrage zu volkswirtschaftlich minimalen Kosten. Die Grundstruktur des Gesamtmodells IMAKUS – bestehend aus drei Teilmodellen zum Kraftwerksausbau (MOWIKA), Speicherausbau (MESTAS) sowie zur Berücksichtigung der Systemzuverlässigkeit (MOGLIE) – ist in Abbildung 1 dargestellt.



Abbildung 1: Grundstruktur des iterativen Hybridmodells IMAKUS

Innerhalb eines Iterationsschrittes stellt die Optimierung des Kraftwerksausbaus das erste Teilproblem dar. Das maßgebliche Ziel ist die kostenminimale Deckung der residualen Last durch den konventionellen Kraftwerkspark, wobei weder bestehende Speicher berücksichtigt noch neue gebaut werden. Die Lösung erfolgt im Teilmodell MOWIKA im Rahmen einer intertemporalen Modellierung des gesamten Betrachtungszeitraums. Dabei wird die residuale Last in Form diskretisierter geordneter Jahresdauerlinien vorgegeben und ausgehend vom Kraftwerksbestand der kostenminimale Kraftwerksneubau bestimmt.

Das Ergebnis des Teilmodells MOWIKA wird anschließend in Form von jährlichen Kraftwerksparks dem zweiten Teilmodell MESTAS übergeben (vgl. Abbildung 1, A). Unter Vorgabe der chronologischen residualen Last in Stundenauflösung wird in diesem Teilmodell der wirtschaftlich optimale Kraftwerks- und Speichereinsatz ermittelt, wobei zu den Bestandsspeichern auch neue Speicher gebaut werden können. Zwar wäre für die Optimierung von Speicherinvestitionen ebenfalls eine intertemporale Betrachtung wünschenswert, aufgrund der – im Vergleich zu Kraftwerken – aufwendigeren Modellierung ist dies jedoch auch mit wenigen Zubauoptionen nicht realisierbar. Stattdessen wird eine Optimie-



rung der Einzeljahre vorgenommen und mit einem sogenannten Grüne-Wiese-Ansatz jedes Jahr der Speicherausbau neu bestimmt. Durch Peak-Shaving und die zusätzliche Integration von Erzeugungsüberschüssen aus EE und KWK ergibt sich im Teilmodell MESTAS ein von der reinen Lastdeckung abweichender Kraftwerkseinsatz, der zu einer Reduktion der Stromerzeugungskosten führt. Zur Anpassung des Kraftwerksausbaus wird der durch die Speicherung veränderte Kraftwerkseinsatz dem Teilmodell MOWIKA als neue Lastanforderung im nächsten Iterationsschritt übergeben (vgl. Abbildung 1, B).

Die Gesamtleistung des im Teilmodell MOWIKA ermittelten jährlichen Kraftwerksparks richtet sich zunächst nur nach dem jeweiligen Jahreshöchstwert der deterministisch vorgegebenen residualen Last. Um die Deckung der Jahresspitze der Stromnachfrage mit einer gewissen Zuverlässigkeit gewährleisten zu können, wird mithilfe des dritten Teilmodells MOGLIE die gesicherte Leistung des Stromerzeugungssystems für ein gewünschtes Zuverlässigkeitsniveau wahrscheinlichkeitstheoretisch bestimmt und mit der Jahreshöchstlast verglichen. Dabei wird der Beitrag der konventionellen Kraftwerke, der Speicher sowie der fluktuierenden Einspeisung aus KWK-Anlagen, Wind- und Wasserkraftwerken zur gesicherten Leistung mit jeweils unterschiedlichen Ansätzen berücksichtigt. Der zusätzliche bzw. verminderte Bedarf an Kraftwerkskapazitäten kann dann im nächsten Iterationsschritt in Form einer zu installierenden Mindestleistung im Teilmodell MOWI-KA berücksichtigt werden (vgl. Abbildung 1, C).

Durch die Rückführung der Informationen des ersten Iterationsschritts kann der Kraftwerksausbau im zweiten Iterationsschritt sowohl an den Einfluss der Speicher als auch an die Anforderungen der Versorgungssicherheit angepasst werden. Anschließend werden wiederum Speicherausbau und -einsatz angepasst und die gesicherte Leistung des Erzeugungssystems neu bestimmt. Die Iteration führt so Schritt für Schritt zu einer besseren Anpassung des Ausbaus und des Einsatzes von Kraftwerken und Speichern. Die Konvergenz dieses iterativen Verfahrens zu einer stabilen und optimalen Lösung wurde in [2] gezeigt.

Beim funktionalen Speicher Elektromobilität wird der Fahrzeugbestand in sechs Nutzergruppen mit jeweils zwei Fahrzeugtypen eingeteilt und damit zu zwölf Speichern zusammengefasst. Die Nutzer- bzw. Fahrzeugtypen repräsentieren hierbei unterschiedliche charakteristische Fahrstrecken, Batteriekapazitäten und spezifische Energieverbräuche. Die benötigte Fahrenergie inkl. Heiz- und Kühlenergie der Fahrzeuge wird deterministisch aus dem Speicher anhand der vorgegebenen Fahrprofile in Stundenauflösung nach Teilprojekt BY 2E [23] entnommen. In den V2G-Szenarios ist im Rahmen der Gesamtoptimierung auch eine Rückspeisung aus der Fahrzeugbatterie ins Stromnetz möglich.

Beim funktionalen Speicher DSM werden nur Anwendungen ohne Nutzereinschränkungen durch den flexiblen Einsatz untersucht. Beispielhaft werden die Auswirkungen von DSM-Anwendungen auf das großtechnische Speicherpotential anhand des flexiblen Betriebs von Kühlschränken und Speicherheizungen untersucht. Die Flexibilität der Kühlschränke wird dabei durch deren thermische Speicherfähigkeit [22] und einem zugelassenen Kühlschrankinnentemperaturbereich von 2 °C bis 7 °C [24] erreicht. Die Flexibilität der Speicherheizungen ist durch die thermische Speicherkapazität des Speicherkerns gegeben. Als Randbedingung muss bei einem flexiblen Einsatz der Speicherheizungen der benötigte Tageswärmebedarf über mindestens zwölf ganze, nicht notwendigerweise zusammenhängende Stunden des jeweiligen Tages bereitgestellt werden.



Neben der Speicherung stellt auch der Export in die Nachbarländer eine Möglichkeit zur Nutzung von Überschüssen aus EE und KWK dar. So ist eine Speicherung der Überschüsse nur dann rentabel, wenn trotz der Speicherverluste die Kosteneinsparungen beim Entladen höher als die Exporterlöse sind. Vereinfachend wurde von tageszeitlich und saisonal unabhängigen Erlösen ausgegangen.

Eine ausführliche Beschreibung der Modellierung findet sich in [9].

5.2 Rahmendaten und Szenariobeschreibungen

5.2.1 Allgemeine Rahmendaten

Als Eingangsgröße dient zunächst der Bestand an thermischen Kraftwerken und Pumpspeicherwerken (PSW) in Deutschland. Die Daten des Kraftwerksbestands umfassen Kraftwerkstyp und Brennstoff, Netto-Engpassleistung, Netto-Wirkungsgrad, Betriebsbeginn und -ende, variable Kosten für Betriebsstoffe sowie Revisions- und Ausfalldauer. Für die deutschen Kernkraftwerke werden die Laufzeiten entsprechend der aktuellen Gesetzeslage angenommen [15]. Die PSW werden durch Nennlade- und Nennentladeleistung, Speicherkapazität, Speichernutzungsgrad sowie etwaige Kosten für Betriebsstoffe beschrieben. Insgesamt beträgt die aktuell installierte Turbinenleistung der PSW 6,5 GW und die installierte Speicherkapazität 77 GWh. Der Speichernutzungsgrad bewegt sich zwischen etwas mehr als 50 % bei älteren und bis zu 80 % bei neueren PSW. Es wird davon ausgegangen, dass im Betrachtungszeitraum keines der bestehenden PSW außer Betrieb genommen wird.

Für den Kraftwerksneubau stehen dem Modell sechs verschiedene Technologien zur Verfügung: Gasturbinen- und GuD-Kraftwerke, Steinkohle- und Braunkohle-Kraftwerke sowie ab dem Jahr 2020 Steinkohle- und Braunkohle-Kraftwerke mit 700 °C-Technologie. Aufgrund der besseren verfügbaren Technik wird angenommen, dass ab dem Jahr 2020 konventionelle Steinkohle- bzw. Braunkohlekraftwerke nicht mehr genehmigungsfähig sind. Die Kraftwerkstechnologien werden jeweils durch die erwarteten Wirkungsgradsteigerungen, die Lebensdauer, die Revisions- und Ausfalldauer sowie die spezifischen Investitionskosten, die Abriss- und Rückbaukosten, die fixen Betriebskosten und die Kosten für Betriebsstoffe charakterisiert. Bei den drei im Rahmen des Projektes betrachteten großtechnischen Speichertechnologien handelt es sich um PSW mit einem Nutzungsgrad von 80 %, adiabate Druckluftspeicher (AA-CAES) mit einem Nutzungsgrad von 70 % sowie Wasserstoffspeicher mit einem Nutzungsgrad von 40 %. Für den Speicherneubau wird von einer Verfügbarkeit von PSW ab Betrachtungsbeginn im Jahr 2010 ausgegangen, sowie von AA-CAES ab dem Jahr 2020 und von Wasserstoffspeichern ab dem Jahr 2025. Dabei wird angenommen, dass AA-CAES aus einem Kompressor zur adiabaten Verdichtung von Luft, einer Salzkaverne als Speichervolumen, einem Wärmespeicher sowie einer Heißluftturbine bestehen. Als Wasserstoffspeicher wird ein System mit einem Gas-und-Dampf-Prozess (GuD) zur Rückverstromung des Wasserstoffs betrachtet. Weitere Bestandteile dieses H₂-GuD-Speichersystems sind die Elektrolyse- und Kompressoreinheit und analog zur Druckluftspeicherung eine Salzkaverne zur Speicherung des Wasserstoffs. Damit sind für Druckluft- und Wasserstoffspeicher Lade- und Entladeleistung sowie Speicherkapazität voneinander unabhängig. Das Ausbaupotential der AA-CAES sowie der H₂-GuD-Speicher bleibt in allen Szenarios unbegrenzt. Da der weitere Ausbau von PSW in Deutschland jedoch durch die notwendigen geographischen Voraussetzungen sowie durch Belange des Umwelt- und Landschaftsschutzes sehr begrenzt ist, wird der



Neubau von PSW-Kapazitäten in allen Szenarios auf 40 GWh limitiert. Auf die Investitionskosten aller Neubauspeicher wird ein prozentualer Abschlag von 50 % durch mögliche alternative Deckungsbeiträge pauschal berücksichtigt, die nicht durch den modellierten Speichereinsatz für Peak-Shaving bzw. die Integration der EE erwirtschaftet werden, wie beispielsweise Erlöse auf dem Regelleistungsmarkt.

5.2.2 Basisszenarios

Als Grundlage wurden im Arbeitskreis Energiewirtschaft drei Basisszenarios definiert, die mögliche zukünftige Entwicklungen des Stromverbrauchs und des Beitrags der EE darlegen. In den Basisszenarios ist bereits Elektromobilität berücksichtigt (ca. 30 Mio. Fahrzeuge im Jahr 2050), wobei die Elektrofahrzeuge proportional zum übrigen Lastprofil geladen werden.

Im Szenario "80/minus15" sinkt der Bruttostromverbrauch bis zum Jahr 2050 auf 533 TWh, d. h. um ca. 15 % bezogen auf das Jahr 2008. Der Anteil der EE am Bruttostromverbrauch beträgt 80 % im Jahr 2050.

Gegenüber dem vorherigen Szenario nimmt im Szenario "80/minus25" der Bruttostromverbrauch bis 2050 u. a. aufgrund verstärkter Effizienzmaßnahmen stärker ab – auf 464 TWh bzw. um 25 % bezogen auf das Jahr 2008. Der Anteil der EE am Bruttostromverbrauch beträgt auch hier 80 % im Jahr 2050.

Das Szenario "60/plus3" geht von einer wachsenden Durchdringung mit elektrischen Anwendungen und damit von einem steigenden Stromverbrauch aus – um 3 % bis zum Jahr 2050 bezogen auf das Jahr 2008, d. h. auf 635 TWh. Der Anteil der EE am Bruttostromverbrauch beträgt in diesem Szenario nur 60 % im Jahr 2050.

5.2.3 Szenarios zu funktionalen Speichern

Neben allen anderen Szenarios, in welchen der Strombedarf für Elektromobilität zwar berücksichtigt ist, Elektrofahrzeuge (EV) aber proportional zum übrigen Lastgang geladen werden, existieren noch folgende Elektromobilitätsszenarios, in denen auch der Ladevorgang der Elektrofahrzeuge durch die Optimierung zum kostengünstigsten Zeitpunkt erfolgt. Als Basis der Elektromobilitätsszenarios dient das Szenario 80/minus15. Unterteilt werden die EV-Szenarios in Szenarios ohne und mit V2G. Der jeweilige Anteil am Fahrzeugbestand [17] wird in Abbildung 2 (links) aufgezeigt. Des Weiteren wird unterschieden nach Szenarios, denen ein guter Infrastrukturausbau für Elektromobilität unterschieden die Fahrzeuge somit überall geladen werden können, und den Szenarios, in denen die Fahrzeuge aufgrund eines geringeren Infrastrukturausbaus nur zu Hause geladen werden können. Eine weitere Variation besteht bei den V2G-Szenarios, indem einerseits für die zusätzlichen Batterieladezyklen durch V2G Kosten in Höhe von 10 €/MWh anfallen und andererseits diese Kosten nicht angerechnet werden.



Abbildung 2: Zeitliche Entwicklung der Durchdringung mit funktionalen Speichern (links) und theoretische Lade- bzw. Entladeleistung der funktionalen Speicher im Jahr 2050 (rechts)

In den DSM-Szenarios werden ausgewählte Haushaltsanwendungen als DSM-fähig betrachtet und deren Strombezug ("Laden") entsprechend optimiert. Als Basis der DSM-Szenarios dient wieder das Szenario 80/minus15.

In einem der DSM-Szenarios werden Kühlschränke (KS) gesteuert zum kostengünstigsten Zeitpunkt geladen. Es wird dabei von einer bestimmten Durchdringung, d. h. einem steigenden Anteil DSM-fähiger Kühlschränke am Gesamtbestand [16] ausgegangen (siehe Abbildung 2, links). Im zweiten DSM-Szenario werden DSM-fähige Speicherheizungen gesteuert zum kostengünstigsten Zeitpunkt geladen, wobei von einer bestimmten Durchdringung, d. h. einem steigenden Anteil DSM-fähiger Speicherheizungen an einem in diesem Szenario gültigen konstanten Gesamtbestand von 2,43 Millionen Anlagen [25] ausgegangen wird (Abbildung 2, links). In allen anderen Szenarios wird angenommen, dass der Speicherheizungsbestand bis 2050 auf 122.000 Anlagen sinkt und keine DSM-fähigen Geräte hinzukommen. Alle nicht DSM-fähigen Speicherheizungen werden gemäß Annahme mit einem Standardlastprofil [18] betrieben.

Während in allen übrigen Szenarios elektrische Energie nicht exportiert werden kann, berücksichtigen die folgenden Szenarios einen möglichen Export, der jeweils zum kostengünstigsten Zeitpunkt erfolgt. Die Basis für die Exportszenarios ist wiederum das Szenario 80/minus15. Zwei unterschiedliche Modellansätze des Stromexports ins benachbarte Ausland finden dabei Verwendung: Im ersten Ansatz wird die Exportleistung durch die aktuell vorhandenen Übertragungskapazitäten (NTC) begrenzt [19]. Dabei werden zudem die erzielbaren Erlöse variiert: In der ersten Variante wird ein starker Ausbau der EE im Ausland unterstellt, was zur Annahme niedrigerer Exporterlöse in Höhe von 5 €/MWh *führt.* Dieser Wert liegt unterhalb der Stromerzeugungskosten der günstigsten konventionellen Kraftwerkstechnologie. Der zusätzliche Einsatz konventioneller Kraftwerke



zu Exportzwecken ist somit nicht rentabel. In der zweiten Variante liegt aufgrund eines schwächeren EE-Ausbaus im Ausland der Exporterlös bei 25 €/MWh. Mit dem exportierten Überschussstrom könnte die Erzeugung von konventionellen Kraftwerken in den jeweiligen Importländern ersetzt werden. Im zweiten Ansatz existiert eine theoretisch unbegrenzte Übertragungskapazität ins benachbarte Ausland. Der Erlös für exportierte elektrische Energie wird hier ebenfalls auf 25 €/MWh festgesetzt.

Neben der vorgegebenen zeitlichen Entwicklung der Durchdringung mit funktionalen Speichern der jeweiligen Szenarios zeigt Abbildung 2 (rechts) auch die theoretischen Lade- bzw. Entladeleistungen der funktionalen Speicher im Jahr 2050 zur Darstellung des technischen Potentials.

5.3 Ergebnisse des Basisszenarios 80/minus15

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Modellrechnungen aufgezeigt. Für das Standard-Szenario 80/minus15 wird die zeitliche Entwicklung der Erzeugungsstruktur (Abbildung 3) sowie von Speicherkapazität, Speicherladeleistung und Speicherentladeleistung (Abbildung 4) dargestellt.

Die Erzeugung aus EE nimmt dabei bis 2050 deutlich zu, wohingegen die Stromproduktion aus konventionellen Kraftwerken kontinuierlich abnimmt. Deutlich wird auch der im Jahr 2022 vollzogene Kernenergieausstieg. Die damit in der Grundlast wegfallende Stromerzeugung wird in den anschließenden Jahren in etwa von neu zugebauten Braunkohlekraftwerken mit 700 °C-Technologie übernommen. Auf der Ordinatenachse negativ dargestellt ist die nicht integrierbare Erzeugung aus EE und KWK in diesem Szenario, die weder direkt noch über Speicherung genutzt werden kann. Im Jahr 2050 betragen die Überschüsse 3,5 TWh. Zum Vergleich könnten ohne Speicherung durch Bestands- und Neubauspeicher in diesem Jahr etwa 44 TWh elektrische Energie aus EE und KWK nicht integriert werden.

Die insgesamt installierte Leistung konventioneller Kraftwerke geht weniger stark zurück als deren Stromerzeugung, was zum einen auf die vergleichsweise geringe Reduktion der auftretenden residualen Spitzenlast zurückzuführen ist. So tragen EE und KWK im Szenario zwar immer mehr zur Stromerzeugung bei, allerdings tritt die Einspeisung nicht notwendigerweise zu Zeitpunkten mit hoher Last auf. Zum anderen hängt die installierte Kraftwerkskapazität nicht nur von der tatsächlich auftretenden Last ab, sondern wird im Modell auch durch das geforderte Niveau der Versorgungssicherheit bestimmt. Der Beitrag der EE zur gesicherten Leistung ist dabei, gemessen an der installierten Leistung, relativ gering. Während die konventionellen Kraftwerke im Szenario 80/minus15 im Jahr 2050 mit ca. 85 % ihrer installierten Leistung zur gesicherten Leistung beitragen, ist beispielsweise der Beitrag der Windkraftanlagen mit ca. 6 % der installierten Leistung deutlich geringer. Aber auch der Beitrag der Speicher zur gesicherten Leistung ist sehr gering, was auf die konservative Abschätzung durch die gewählte Methodik zurückzuführen ist [1]. So tragen Bestands- und Neubauspeicher zusammen im Jahr 2050 nur mit ca. 2 % ihrer installierten Entladeleistung zur gesicherten Leistung bei. Um das geforderte Zuverlässigkeitsniveau von 99,5 % dennoch zu erreichen, werden durch das Modell zusätzlich günstige Gasturbinenkapazitäten installiert.





Abbildung 3: Entwicklung der Stromerzeugung im Szenario 80/minus15

Die Entwicklung der wirtschaftlich neu zu installierenden Speicherkapazität ist in Abbildung 5.4 (links) abgebildet. Zur einfacheren Darstellung ist nur jedes fünfte Jahr abgebildet. Zusätzlich werden auch die bestehenden PSW-Kapazitäten dargestellt. Ein Zubau von PSW findet ab dem Jahr 2018 statt, wobei die noch zusätzlich verfügbare Speicherkapazität von 40 GWh vollständig ausgeschöpft wird. Ab dem Jahr 2037 beginnt der Zubau von AA-CAES-Kapazitäten, die im Jahr 2050 ca. 0,6 TWh erreichen. Der Zubau von Wasserstoffspeichern findet ab dem Jahr 2043 statt. Bei dieser Technologie nimmt die Kapazität bis 2050 auf etwa 3,4 TWh zu. Im Jahr 2050 ist damit – inklusive der bestehenden Anlagen – ein Speichervolumen von ca. 4 TWh installiert.

Der Ausbau an Ladeleistung im Betrachtungszeitraum ist in Abbildung 4 (Mitte) abgebildet. Bei den PSW steigert sich die installierte Ladeleistung auf etwa 3.000 MW ab dem Jahr 2035. Eine weitere Steigerung zu späteren Zeitpunkten ist aufgrund des begrenzten Speichervolumens wirtschaftlich nicht sinnvoll. Die installierte Ladeleistung bei AA-CAES steigert sich bis zum Jahr 2050 auf etwa 20.000 MW, wohingegen diese bei den Wasserstoffspeichern mit ca. 9.000 MW deutlich geringer ausfällt. Inklusive der bereits bestehenden PSW-Anlagen beträgt die installierte Ladeleistung der Speicher im Jahr 2050 insgesamt knapp 38 GW.





Abbildung 4: Entwicklung von Kapazität, Lade- und Entladeleistung der Speicher im Szenario 80/minus15

Bei der installierten Entladeleistung (Abbildung 4, rechts) zeigt sich ein etwas anderes Bild als bei der Ladeleistung. Da bei neuen PSW in der Regel Pumpturbinen installiert werden, wurden Lade- und Entladeleistung bei diesem Speichertyp aneinander gekoppelt und bewegen sich deshalb auf einem ähnlichen Niveau. Bei den AA-CAES beträgt die installierte Entladeleistung im Jahr 2050 hingegen ca. 10.000 MW, was etwa der Hälfte der Ladeleistung entspricht. Im Bereich der Wasserstoffspeicher werden lediglich ca. 2.000 MW an Entladeleistung installiert, was etwa ein Fünftel der Ladeleistung darstellt. Zwei Gründe führen zu der auftretenden Ungleichheit zwischen installierter Lade- und Entladeleistung. Zum einen ist aufgrund der Speicherverluste die Ladeenergie grundsätzlich größer als die mögliche Entladeenergie. Deshalb ist die Installation einer geringeren Entladeleistung prinzipiell nachvollziehbar. Der zweite Effekt ist die Form der auftretenden Erzeugungsüberschüsse, die mithilfe der Ladeeinheit eingespeichert werden. Sie sind überwiegend durch eine vergleichsweise hohe Leistung und eine geringe zeitliche Ausdehnung gekennzeichnet. Um die Energiemenge dennoch aufnehmen zu können, sind folglich höhere Ladeleistungen notwendig. Für den Entladeprozess stehen hingegen viele Zeitpunkte zur Verfügung, wodurch auch mit einer relativ geringen Entladeleistung die Energie aus den Speichern abgegeben werden kann.

5.4 Ergebnisse weiterer Szenarios

Nachfolgend werden die Auswirkungen von Veränderungen des Nettostrombedarfs, des Anteils der EE und von funktionalen Speichern auf das großtechnische Neubauspeicherpotential anhand von Kapazität, Ladeleistung und Entladeleistung jeweils für das Jahr 2050 dargestellt (Abbildung 5). Daneben wird mittels der über den Betrachtungszeitraum kumulierten nicht integrierbaren gesetzten Einspeisung die Fähigkeit der funktionalen Speicher, elektrische Energie aus EE und KWK zu integrieren, gezeigt. Die Ergebnisse der EV-, DSM- und Export-Szenarios basieren bezüglich des Stromverbrauchs und des Anteils der EE auf Szenario 80/minus15 und sind deshalb mit diesem zu vergleichen.





Abbildung 5: Vergleich von Kapazität (l. o.), Ladeleistung (r. o.) und Entladeleistung (r. u.) der Neubauspeicher für das Jahr 2050 sowie der kumulierten nicht integrierbaren gesetzten Einspeisung des gesamten Betrachtungszeitraums (l. u.) für alle Szenarios [10]

Die neben den bereits bestehenden Speichern zusätzlich wirtschaftliche Kapazität ist in Abbildung 5 (I. o.) abgebildet. Das größte wirtschaftliche Potential tritt dabei im Szenario 80/minus25 auf, wohingegen der geringste Zubau im Szenario 60/plus3 stattfindet. Insgesamt bewegt sich der Zubau in den Szenarios zwischen 0,2 TWh und 4,9 TWh. Die zusätzlich installierten Ladeleistungen sind rechts oben dargestellt. Der maximale Zubau tritt dabei in Szenario 80/minus15 auf. Der geringste Ausbau an Ladeleistung findet im Szenario 60/plus3 statt. Die Leistungen bewegen sich zwischen 8,5 GW und 31,4 GW. Damit ist die Schwankungsbreite bei der installierten Ladeleistung deutlich geringer als bei der installierten Speicherkapazität. Rechts unten ist im selben Maßstab die installierte Entladeleistung der neu gebauten Speicher für das Jahr 2050 dargestellt. Wie schon im Szenario 80/minus15 liegt auch bei allen anderen betrachteten Szenarios der Wert der installierten Entladeleistung unter der jeweils zugehörigen Ladeleistung.

Aus dem Diagramm ist zu erkennen, dass allein das gesteuerte Laden von Elektrofahrzeugen das wirtschaftliche Speicherpotential bezüglich der Kapazität um etwa 0,8 TWh reduziert. Auch Lade- und Entladeleistung lassen sich dadurch deutlich reduzieren. Besteht die Lademöglichkeit der Elektrofahrzeuge jedoch nur zu Hause, so fällt die Reduk-



tion von Lade- und Entladeleistung deutlich geringer aus. Die Ursache für den deutlich höheren Bedarf ist in diesem Fall die geringere Flexibilität im Ladevorgang. Die V2G-Option führt dagegen nur zu einer sehr geringen zusätzlichen Reduktion der genannten Größen beim Speicherausbau, selbst wenn für die Rückspeisung keine weiteren Kosten anfallen. Die vergleichsweise hohe Anzahl an Elektrofahrzeugen im Jahr 2050 bietet bereits durch die Möglichkeit des gesteuerten Ladens ein hohes Maß an Flexibilität, welche die Integration von Überschüssen aus EE deutlich erleichtert. Für die dennoch benötigte Speicherung von Energie bieten im kurzfristigen Bereich Pumpspeicherwerke gegenüber V2G jedoch die höhere Effizienz. Des Weiteren ist für eine längerfristige Speicherung die Speicherkapazität der Fahrzeuge zu gering bzw. die Flexibilität der Batteriespeicher aufgrund der noch zu bewältigenden Fahraufgabe nicht groß genug. Trotz der gegenüber V2G höheren Kosten und geringeren Effizienz finden deshalb Wasserstoffspeicher und AA-CAES einen wirtschaftlichen Platz im Speicherportfolio.

Die DSM-Option für Kühlschränke führt einerseits zu einer leichten Erhöhung der wirtschaftlichen Speicherkapazität, andererseits zu einer geringen Reduktion von Lade- und Entladeleistung großtechnischer Speicher. Trotz der hohen Durchdringung und der großen Zahl an Kühlschränken ist das Potential dieser Anwendung, Speicherbedarf zu verringern, aufgrund der niedrigen Gesamtleistung (Abbildung 2) und der geringen thermischen Kapazität (0,018 TWh) äußerst eingeschränkt. Ein deutlich größeres Reduktionspotential insbesondere bezüglich der großtechnischen Speicherkapazität weisen Speicherheizungen auf. Dies ist zum einen durch die höhere Ladeleistung der Speicherheizungen (30 GW) und die höhere thermische Kapazität (0,238 TWh) begründet. Zum anderen sind die etwas veränderten Rahmenbedingungen (Kapitel 5.2.3) zu berücksichtigen.

Auch die Exportfunktion führt zu einer Reduktion des Speicherpotentials. Die Variante mit unveränderter Übertragungskapazität und Erlösmöglichkeiten von 5 €/MWh zeigt dabei die geringste Veränderung. Können Erlöse von 25 /MWh erzielt werden, ist nur noch etwa die Hälfte der Speicherkapazität des Referenzfalls wirtschaftlich. Der Extremfall, dass die Exportleistung theoretisch unbegrenzt ist, ergibt immerhin noch eine wirtschaftliche Speicherkapazität von 2,0 TWh. Diese Variante führt, wie anzunehmen war, zu einer vollständigen Integration aller Überschüsse. Die Exportleistung beträgt dabei maximal 30 GW.

5.5 Weitere Untersuchungen

In Kapitel 2.2 wurde bereits das mögliche Rückbauproblem des "Grüne-Wiese-Ansatzes" beim Ausbau der Speicher angesprochen. Für das Szenario 80/minus15 wurde deshalb zum Vergleich auch die Variante mit der Übernahme des Speicherzubaus aus dem Vorjahr durchgeführt, was durch eine Erweiterung des zuvor beschriebenen Modells möglich wurde. Dabei zeigt sich, dass im Fall des "Grüne-Wiese-Ansatzes" bei der installierten Entladeleistung der PSW ab dem Jahr 2035 ein leichter Rückgang auftritt. Bei Übernahme der Installation aus dem Vorjahr wird deshalb mehr Entladeleistung installiert, was zu einer geringfügig niedrigeren Installation im Bereich der AA-CAES führt. Auf die Wasserstoffspeicherung sind keine Auswirkungen erkennbar. Im Bereich der installierten Ladeleistung und der Speicherkapazität findet bei allen Technologien ein kontinuierlicher Zubau über den Betrachtungszeitraum statt, was im Wesentlichen auf den ebenfalls steigenden Ausbau an fluktuierender Erzeugung aus EE zurückzuführen ist. Die Wahl der Methodik hat deshalb bei diesen Parametern keinen Einfluss.



5.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Abschließend kann festgehalten werden, dass ein starker Ausbau von EE und KWK ein maßgeblicher Treiber für ein hohes Potential der großtechnischen Energiespeicher ist, weshalb ein großer Teil des Speicherausbaus erst ab dem Jahr 2030 stattfindet. Allerdings führt der volkswirtschaftlich optimale Speicherausbau nicht zu einer vollständigen Integration der Stromerzeugung aus EE und KWK. Bis zum Jahr 2050 werden Kapazitäten im einstelligen TWh-Bereich und Leistungen im zweistelligen GW-Bereich wirtschaftlich. Die installierten Kapazitäten liegen damit um Größenordnungen über dem heutigen Bestand. Es wird deutlich mehr Lade- als Entladeleistung installiert. Unter den hier unterstellten Rahmenbedingungen finden alle drei großtechnischen Speichertechnologien, d. h. PSW. AA-CAES sowie Wasserstoffspeicher, in fast allen Szenarios einen Platz im Portfolio. Lediglich im Szenario 60/plus3 sind Wasserstoffspeicher nicht wirtschaftlich, da hier keine großen Mengen an überschüssiger elektrischer Energie auftreten. Insbesondere PSW, aber auch AA-CAES werden zur kurzfristigen Speicherung von Überschüssen sowie zum Peak-Shaving eingesetzt, wohingegen der Ausbau der Wasserstoffspeicher vorrangig für die saisonale Speicherung von Überschüssen erfolgt. Die Integration großer Überschussmengen ist ohnehin nur mit Wasserstoffspeichern wirtschaftlich darstellbar. Werden keine oder niedrigere zusätzliche Erlösmöglichkeiten auf dem Regelenergiemarkt angesetzt als 50 % der Investitionskosten, würde das wirtschaftliche Speicherpotential deutlich niedriger ausfallen.

Die funktionalen Speicher verbessern die Integration der Überschüsse aus EE und KWK bei gleichzeitiger Reduktion des wirtschaftlichen Potentials für großtechnische Speicher. Allein die erhöhte Lastflexibilität durch das gesteuerte Laden der Elektrofahrzeuge führt bereits zu einer deutlichen Reduktion des wirtschaftlichen Speicherpotentials. Dagegen wirkt sich eine zusätzliche Rückspeiseoption der Elektrofahrzeuge (V2G) auf das wirtschaftliche Speicherpotential im Normalfall nur sehr begrenzt aus. Lediglich eine deutliche Erhöhung der Kapazität der Fahrzeugbatterie würde einen stärkeren Einfluss auf das wirtschaftliche Potential großtechnischer Speicher haben. Auch die Flexibilität durch den zeitlich verschiebbaren Stromverbrauch der DSM-Anwendungen reduziert je nach Anwendung das wirtschaftliche großtechnische Speicherpotential mehr oder weniger stark. Durch eine Exportoption wird das Speicherpotential ebenfalls, je nach Höhe des Exporterlöses, reduziert. Hohe Exporterlöse sind für den Fall denkbar, dass in den Nachbarländern selbst keine Überschüsse aus EE vorhanden sind. Eine Erhöhung der Übertragungskapazitäten spielt bezüglich einer Reduktion des großtechnischen Speicherbedarfs nur eine untergeordnete Rolle.

Die Größenordnungen des im Rahmen der Berechnungen bestimmten Speicherausbaus sind in der Praxis darstellbar. Dies trifft auch für die benötigten Kavernen der AA-CAES und Wasserstoffspeicher zu. Aufgrund des unterstellten idealen Netzes stellen die aufgeführten Potentiale eher eine untere Grenze des wirtschaftlich sinnvollen Speicherpotentials dar. Der Beitrag der Speicher zur gesicherten Leistung wird mit der gewählten Methodik tendenziell unterschätzt. Somit kann davon ausgegangen werden, dass in Realität ein geringerer Umfang an konventionellen Backup-Kapazitäten notwendig ist, als die Modellergebnisse zeigen. Der Kraftwerkseinsatz wird im Modell vereinfacht abgebildet, wobei die Flexibilität der Grundlastkraftwerke überschätzt wird. Dies führt dazu, dass das Modell tendenziell Kohlekraftwerke gegenüber Gaskraftwerken bevorzugt.



5.7 Ausblick

Die Ergebnisse des Speicherausbaus hängen in hohem Maße von Form und Menge der überschüssigen Erzeugung und somit von den gewählten Eingangsdaten ab. Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit anderen Arbeiten ist folglich nur mit Blick auf die Datengrundlage gegeben. Um robustere Aussagen treffen zu können, sollten deshalb auch andere charakteristische Zeitreihen für Last und gesetzte Einspeisung betrachtet werden. Für weiterführende Untersuchungen, insbesondere in den Bereichen Wasserstoffspeicherung, Elektromobilität und DSM, ist das Modell gut geeignet. Auch weitere Speichertechnologien lassen sich im Modell implementieren.

6 Wesentliche terminliche und inhaltliche Abweichungen zum Projektantrag

Die modelltechnische Umsetzung wurde im Rahmen der Gesamtlaufzeit des Teilprojektes, d.h. bis 31.12.2011 erfüllt. Aufgrund von Verzögerungen bei der Abstimmung von Daten mit anderen Teilprojekten und den Industriepartnern kam es zu zeitlichen Verschiebungen bei der finalen Durchführung der Simulationen und deren Auswertung. Der Abschluss der notwendigen Simulationen und die Erstellung des Berichts für den Industriepartner waren am 27.07.2012 abgeschlossen.

Die im Antrag formulierten Untersuchungsgegenstände wurden im Rahmen des Projektes vollumfänglich bearbeitet, die Ergebnisse ausgewertet und in Kapitel 5 dargestellt.

7 Publikationen und Patente

7.1 Im Rahmen des Projektes entstandene Publikationen

7.1.1 Begutachtete Publikationen

- [1] Kuhn, P.: Iteratives Modell zur Optimierung von Speicherausbau und -betrieb in einem Stromsystem mit zunehmend fluktuierender Erzeugung. Dissertation, TU München, eingereicht im Dezember 2011.
- [2] Kuhn, P.; Kühne, M.: Optimierung des Kraftwerks- und Speicherausbaus mit einem iterativen und hybriden Modell. In: Optimierung in der Energiewirtschaft. VDI-Berichte 2157. 9. Fachtagung Optimierung in der Energiewirtschaft. Nürtingen, 22.-23.11.2011. Düsseldorf, 2011: VDI-Verlag, S. 305–317.

7.1.2 Nicht-begutachtete Publikationen

- [3] Kühne, M.; Kuhn, P.; Heilek C.: Wirtschaftliches Potenzial großtechnischer Energiespeicher im deutschen Stromsystem. et – Energiewirtschaftliche Tagesfragen – Zeitschrift für Energiewirtschaft, Recht, Technik und Umwelt 62. Jg. (2012) Heft 12.
- [4] Kuhn, P.: Speicherbedarf im Stromnetz. In: Energieeffizienz eine stete Herausforderung an Wissenschaft und Praxis, Tagungsband zur FfE-Fachtagung 2011, FfE-Schriftenreihe – Band 30. München, Mai 2011.



- [5] Kühne, M.: Optimierung des Kraftwerks- und Speicherausbaus mit einem iterativen und hybriden Modell. Vortrag anlässlich der 9. Fachtagung Optimierung in der Energiewirtschaft. Nürtingen, 22.-23.11.2011.
- [6] Kuhn, P.: Speicherbedarf im Stromsystem der Zukunft. Vortrag im Rahmen des Energiewirtschaftlichen Seminars am 09.01.2012, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Technische Universität München.
- [7] Kuhn, P.; Kühne, M.; Heilek, C.; Hamacher, Th.: Positionspapier zu Speichertechnologien – Ergebnisse einer Energiesystemmodellierung. Positionspapier zum Technik-Dialog 2012 der Bundesnetzagentur zum Thema Speichertechnologien. Bonn, 16.03.2012.
- [8] Kühne, M.: Stromspeicher. Potential für großtechnische Speicher in Deutschland – Ergebnisse einer Stromsystemmodellierung. Vortrag im Rahmen des Seminars des VDE-Arbeitskreises Energietechnik, VDE-Bezirksverein Südbayern e. V. München, 24.05.2012.
- [9] Kuhn, P.; Kühne, M.; Heilek C.: Integration und Bewertung erzeuger- und verbraucherseitiger Energiespeicher; KW21 – Kraftwerke des 21. Jahrhunderts. Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Technische Universität München. September 2012. Online-Veröffentlichung unter: http://mediatum.ub. tum.de/node?id=1115629
- [10] Kühne, M.; Heilek, C.: Integration und Bewertung erzeuger- und verbraucherseitiger Energiespeicher. Vortrag im Rahmen des Energiewirtschaftlichen Seminars am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Technische Universität München am 12.11.2012
- [11] Kühne, M., Kuhn, P., Tzscheutschler, P.: Emissions- und Kostenbewertung des geplanten PSW Atdorf. In: Abschlussbericht zur Studie Analyse der Notwendigkeit des Ausbaus von Pumpspeicherwerken und anderen Stromspeichern zur Integration der erneuerbaren Energien, Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Berlin 2010.
- [12] Heilek, C.; Kühne, M.; Tzscheutschler, P.: Energiewirtschaftliche Bewertung der Wärmepumpe in der Gebäudeheizung. Studie im Auftrag des Bundesverbandes Wärmepumpe e. V., München, 14.01.2013.
- [13] Heilek, C.: Energie und Elektromobilität Ein Rundumblick und aktuelle Forschungsergebnisse zu Zukunftsszenarios. Vortrag im Rahmen des Fachkongresses E-mobility meets Contracting. München, 16.05.2013.
- [14] Kuhn, P.: Szenarien zur Entwicklung der Speicherkapazität in Deutschland. Tagungsbeitrag zur FfE-Fachtagung 2013. FfE-Schriftenreihe Band 31. München, Mai 2013.

7.2 Gemeinsame Publikationen zweier oder mehrerer KW21 Teilprojekte

Es gab keine gemeinsamen Publikationen mit anderen Teilprojekten.



7.3 Weitere Publikationen

- [15] Dreizehntes Gesetz zur Änderung des Atomgesetzes vom 31.07.2011 (13. AtGÄndG). Bundesgesetzblatt (2011) Teil I Nr. 43, S. 1704-1705
- [16] Statistisches Bundesamt: Wirtschaftsrechnungen Laufende Wirtschaftsrechnungen - Ausstattung privater Haushalte mit ausgewählten Gebrauchsgütern 2010. Wiesbaden am 11.08.2011. S. 14 - Ausstattungsbestand; Artikelnummer: 2150200107004
- [17] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.); Bearbeitet von: Radke, S.; Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung: Verkehr in Zahlen 2011/2012. 40. Jahrgang. DVV Media Group GmbH. Hamburg 2011. ISBN 978-3-87514-456-9
- [18] Energie Baden-Württemberg AG: Synthetische Lastprofile der EnBW Regional AG. Lastprofil Elektrospeicherheizung EnBW-HZ2. Profilschar gültig ab 01.05.2005. Aus: http://www.enbw.com/content/de/netznutzer/ stromverteilnetz/netznutzung/lastprofile/index.jsp, Februar 2012.
- [19] [European Network of Transmission System Operators for Electricity ENTSO-E: Indicative values for Net Transfer Capacities (NTC) in Continental Europe. Prepared by RGCE SG Network Models and Forecast Tools. Brüssel, Februar 2011. Aus: https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/_library/ntc/ archive/ NTC-Values-Winter-2010-2011.pdf
- [20] Gobmaier, T.; Bernhard, D.; von Roon, S.: Märkte für Demand Side Management. Langfassung zum Vortrag beim 12. Symposium Energieinnovation, 15.-17.02.2012, Graz. Aus: http://portal.tugraz.at/portal/ page/portal/TU_Graz/ Einrichtungen/Institute/Homepages/i4340/veranstaltungen/eninnov2012/ praesentationen, Stand: 18.07.2012.
- [21] Gobmaier, T. et al: Simulationsgestützte Prognose des elektrischen Lastverhaltens. Verbundprojekt im Rahmen der Forschungsinitiative Kraftwerke des 21. Jahrhunderts (KW21) Phase II, Teilprojekt BY 3E. Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V. (FfE). München, 2012.
- [22] Grein, A. (ifeu); Pehnt, M. (ifeu); Duscha, M. (ifeu); Kellerbauer, H. (UDE): Modellstadt Mannheim in der Metropolregion Rhein-Neckar, Mannheim - Nutzung von thermischen Speichern als Energiespeicher (AS1.06), Version 1.0, 31.07.2009, MVV Energie AG. Mannheim, 2009.
- [23] Mezger, T.: Einsatzmöglichkeiten von Elektrostraßenfahrzeugen zum Lastmanagement. Verbundprojekt im Rahmen der Forschungsinitiative Kraftwerke des 21. Jahrhunderts (KW21), Phase II, Teilprojekt BY 2E. Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V. (FfE). München, 2012.
- [24] Stadler, I.: Demand Response Nichtelektrische Speicher f
 ür Versorgungssysteme mit hohem Anteil erneuerbarer Energien. Habilitation. Kassel, Oktober 2005.
- [25] Wohlauf, G.; Thomas, S.; Irrek, W.; Hohmeyer, O.: Ersatz von Elektro-Speicherheizungen durch effiziente Brennwerttechnik – Beschreibung eines möglichen Förderprogramms eines Energieeffizienz-Fonds. Überarbeiteter Endbericht im Auftrag der Hans-Böckler-Stiftung. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH. Wuppertal, Oktober 2005. S. 4


7.4 Im Rahmen des Projektes entstandene Patente

Im Rahmen dieses Teilprojektes sind keine Patente entstanden.

8 Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses

8.1 Studentische Mitarbeiter

Dschung, F. Ermittlung der volkswirtschaftlichen Kosten der Strombereitstellung in Deutschland.

Mansouri, M. Visualisierung des deutschen Kraftwerksparks in Google Earth; Analyse der Preise am Sekundärregelmarkt.

8.2 Studien-, Semester- und Bachelorarbeiten

Angelousis, S. Bestimmung des Potentials adiabater Druckluftspeicher in Deutschland. Bachelor's Thesis, 2009. Belete, A. Technische und wirtschaftliche Analyse von Pumpspeicherwerken zur Bestimmung des Repowering-Potentials in Deutschland. Studienarbeit. 2009. Hofer, M. Analyse und Bewertung der verfügbaren Daten zur Prognose der Windenergieerzeugung. Studienarbeit, 2011. Krasemann, A. Analyse der Struktur und Einsatzstrategien von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen in Europa. Bachelor's Thesis, 2011. Leitl, M. Untersuchung von Verfahren zur gasförmigen Speicherung elektrischer Energie in der bestehenden Erdgasinfrastruktur. Bachelor's Thesis. 2012. Raksha, T. Analyse der Stromübergabe zwischen Deutschland und dem benachbarten Ausland, Studienarbeit, 2009, Ufkes, A. Technische und wirtschaftliche Entwicklung der Stromerzeugung aus Photovoltaik. Studienarbeit. 2011.

8.3 Diplom- und Masterarbeiten

Bader, A.	Untersuchung der Einflüsse verschiedener Faktoren auf die Regelleistungsbereitstellung in einem Kraftwerksportfolio. Diplomarbeit, 2010.
Biedermann, B.	Systemdienstleistungs-Bonus für Windkraftanlagen. Diplomarbeit, 2009.
Campestrini, M.	Untersuchung des deutschen Kraftwerksparks mit wachsendem Anteil an regenerativer Stromerzeugung. Diplomarbeit, 2010.
Forero, M.	Optimierte Auslegung eines Speichersystems für eine Insel mit Festlandanschluss, Diplomarbeit, 2011.



Hausl, S.	Entwicklung eines Optimierungsmodells der Stromversorgung Deutschlands. Diplomarbeit, 2010.
Lex, W.	Wirtschaftliches Potenzial von Wasserstoffspeichern in der Stromerzeugung der Zukunft. Bachelor's Thesis, in Bearbeitung.
Raksha, T.	Untersuchung von Wasserstoffsystemen zur großtechnischen Speicherung elektrischer Energie. Diplomarbeit, 2010.
Rauchecker, T.	Modellgestützte Analyse des Einsatzes von Lastmanagement- maßnahmen in der Elektrizitätswirtschaft. Diplomarbeit, 2011.
Unutmaz, G.	Simulationsgestützte Untersuchung von Investitionsplanungs- ansätzen in der Energiewirtschaft. Master's Thesis, 2010.
Winkler, S.	Entwicklung eines Ansatzes zur Optimierung des Ausbaus an erneuerbarer Stromerzeugung für das Kraftwerksausbaumodell MOWIKA. Diplomarbeit, 2012.

8.4 Promotionen

Kuhn, P.	Iteratives Modell zur Optimierung von Speicherausbau und -betrieb in einem Stromsystem mit zunehmend fluktuierender Erzeugung, 2012.
Heilek, C.	Optimierung des Zubaus und Einsatzes von Kraft-Wärme- Kopplungsanlagen im deutschen Energieversorgungssystem, in Bearbeitung.
Kühne, M.	Treiber des Ausbaus der Energiespeicherung im deutschen Stromsystem - Eine detaillierte Analyse von Methodik und Ergebnissen des Optimierungsmodells IMAKUS, in Bearbeitung.

9 Forschungsprogramme des Bundes und der EU

9.1 Angaben, ob weitere Drittmittel zum Projektthema eingeworben wurden, insbesondere aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen des Bundes und der EU

Zum vorliegenden Projektthema konnten weitere Drittmittel aus der Privatwirtschaft eingeworben werden.

9.2 Geplante Antragsstellung bzw. künftige Förderung aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen von Bund, EU etc. sowie allgemeinen Förderprogrammen (z. B. DFG)

Bezüglich der genannten Forschungs- und Förderprogramme sind nach aktuellem Stand Antragsstellungen weder erfolgt noch geplant.



Arbeitskreis Energiewirtschaft

Projekt: BY 2E

Einsatzmöglichkeiten von Elektrostraßenfahrzeugen zum Lastmanagement

Projektleiter:	Prof. DrIng. W. Mauch Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.
Mitarbeiter:	DiplIng. T. Mezger
	DiplIng. (FH) T. Rasilier
	DiplIng. M. Brüggemann
	DiplIng. T. Gobmaier
	DiplPhys. R. Corradini
	S. Hohlenburger
Finanzierung:	E.ON Energie AG
	EnBW AG
	Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst
	Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie



1 Ausgangssituation

1.1 Motivation

Die Einbindung von Elektrostraßenfahrzeugen (EV) stellt die Energiewirtschaft vor große Herausforderungen. Im Hinblick auf die Kraftwerkskapazitäten, die in den künftigen Jahren zu installieren sind, und der wachsenden Bedeutung der Elektromobilität ist die Kenntnis ihrer möglichen Rückwirkungen von hoher praktischer Relevanz. Mithilfe geeigneter Ladealgorithmen für Elektrofahrzeuge wird es möglich, die Rückwirkungen auf das Netz zu analysieren, zu steuern und dadurch den volkswirtschaftlichen Mehrwert der Elektrostraßenfahrzeuge zu erhöhen.

Aus der Studie "Elektrostraßenfahrzeuge, Elektrizitätswirtschaftliche Einbindung von Elektrostraßenfahrzeugen" [7] geht hervor, dass eine ungesteuerte Ladung von EV große energiewirtschaftliche Rückwirkungen haben kann.



Abbildung 1: Ladelastgang der Flotte im ungesteuerten Fall

In Abbildung 1 sind die Ladelastgänge zweier EV Flotten mit unterschiedlicher Anzahl an Fahrzeugen dargestellt. Die grüne Fläche gibt die Ergebnisse des optimistischen Entwicklungsszenarios der Elektromobilität, in dem 8 Mio. EV zugrunde gelegt wurden, wieder. Beim pessimistischen Szenario, dessen Verlauf in orange dargestellt wird, wurde lediglich mit einer Anzahl von 0,8 Mio. Fahrzeugen gerechnet.

Der Ladelastgang des optimistischen Szenarios erreicht maximal etwa 7 GW, was einer zusätzlichen Spitzenleistung von etwa 10 % entspricht. In der Abbildung ist zudem zu erkennen, dass die Maximalwerte der EEX-Preise mit den Leistungsspitzen korrelieren. Dies bedeutet, dass der Energiebezug zu anderen Zeiten (z. B. in der Nacht) aus energie-



wirtschaftlicher und auch aus Nutzersicht sinnvoller sein könnte.

Diese Zusammenhänge werden im Zuge dieses Projekts näher betrachtet, um in Abhängigkeit einer definierten Anzahl an Elektrofahrzeugen geeignete Lademodelle zu finden, die sowohl aus nutzer- als auch energiewirtschaftlicher Sicht einen Mehrwert darstellen. Nachfolgend wird auf die Vorgehensweise sowie deren einzelne Bestandteile eingegangen.

1.2 Methodik

Für die Untersuchung des Nutzungs- und potenziellen Ladeverhaltens der Elektrofahrzeuge wird ein spezielles Simulationsprogramm entwickelt.



Abbildung 2: Methodik

Wie Abbildung 2 zeigt, ist die Gesamtsimulation in die beiden Teilaspekte Energiewirtschaft sowie Batterie- und Nutzerbetrachtung unterteilt. Beide Modelle werden nachfolgenden näher beschrieben.

1.2.1 Energiewirtschafts-Modell

Im Rahmen der energiewirtschaftlichen Betrachtung wurden unterschiedliche Modelle zum Laden einer EV Flotte definiert und deren Eignung aus Nutzer- sowie aus energiewirtschaftlicher Sicht analysiert. Das Ziel war es, geeignete Lademodelle zu identifizieren, die einen energiewirtschaftlichen Mehrwert bieten und zudem die Bedürfnisse der Fahrer erfüllen.

Die Methodik des Energiewirtschafts-Modells (EWi-Modell) wurde im Zwischenbericht vom 26. Januar 2011 und in [4] detailliert dargestellt. Im Rahmen dieses Berichts sollen die Ergebnisse dieser Betrachtung dargestellt werden.

1.2.2 Detaillierte Batterie- und Nutzersimulation

Dieser Teil der Simulation ist dem EWi-Modell nachgeschaltet. Das Ziel hierbei war es, die Ergebnisse des EWi-Modells nochmals aus der Sicht einzelner Nutzern zu betrachten. Dabei standen speziell die Batterie und deren Verhalten durch die Einwirkungen der Nut-



zung bzw. des Ladens des Fahrzeugs im Fokus. Die im vorherigen Schritt als geeignet identifizierten Lademodelle sollten aus Sicht der Batterie und dabei vor allem der Alterung untersucht werden. Hieraus sollten sich Aussagen ableiten lassen, welche Lademöglichkeiten für die jeweiligen Nutzergruppen anwendbar sind.

Es soll im Rahmen dieses Berichts insbesondere auf Methodik und Ergebnisse der Batterie- und Nutzersimulation eingegangen werden.

2 Projektziele

Unter der Annahme, dass sich Elektrostraßenfahrzeuge mittel- bis langfristig im Markt durchsetzen und die regenerative Stromerzeugung an Bedeutung gewinnt, werden sich in Deutschland/Europa die Netzverhältnisse grundsätzlich verändern.

Ziel dieses Projektes ist die Erarbeitung von Konzepten, wie das Laden von Elektrofahrzeugen in der Zukunft erfolgen kann – und wie dabei möglicherweise Netzfunktionen/ Netzdienstleistungen übernommen werden können.

Ein wesentlicher Aspekt bei der Analyse der extern gesteuerten Lademodelle ist die dadurch verursachte schnellere Alterung der Batterie. Dieser Effekt soll beim Vergleich der Lademodelle berücksichtigt werden.

2.1 Umsetzung der Hinweise aus den bisherigen Begutachtungen

In der Zwischenbegutachtung vom 17. März 2011 wurden folgende Punkte angemerkt:

- Es sollte überprüft werden, ob eine dynamische Zuordnung von Fahrzeugen auf Pendlerklassen aufgrund veränderter Batteriekapazitäten möglich ist. Dies ist mit dem aktuellen Model nicht möglich, da die Zuordnung über die Nutzungsstatistiken im EWi-Model erfolgt.
- 2. Die Ergebnisse der Batteriemessungen sollen im Lichte der vorhandenen internationalen Studien eingeordnet werden. Dies wurde bereits im Endbericht der Batteriemessungen durchgeführt [3].
- Die Verknüpfung mit den Projekten BY 1E und BY 3E sollte sicherstellen, dass die Potenziale der EV bei der Dimensionierung der zentralen Speicher berücksichtigt wird. Dies wurde wunschgemäß realisiert. Die Ergebnisse aus BY 1E berücksichtigen die Einflüsse durch die Elektromobilität.

3 Vernetzung

3.1 Vernetzung innerhalb KW21

Das Projekt BY 2E ist eng mit den Projekten BY 1E und BY 3E verknüpft.

Um die Ergebnisse aller BY E und BW E Projekte untereinander nutzen zu können, wurden in einem ersten Schritt gemeinsame Rahmenbedingungen abgestimmt und allen Projekten des Arbeitskreises Energie zur Verfügung gestellt.



Es wurden zudem Modellergebnisse zwischen den Teilprojekten ausgetauscht und validiert. Für die Auswertung des EWi-Modells werden Kraftwerksdaten aus dem Teilprojekt BY 1E genutzt. Diese Betrachtung wird erweitert, indem im Teilprojekt BY 1E der Einfluss auf das Stromsystem untersucht wird. Hierzu soll im Rahmen des Projekts BY 1E die Bereitstellung der Ladeenergie der EVs in die volkswirtschaftliche Gesamtoptimierung einbezogen werden.

Der Ladelastgang soll ebenfalls im Teilprojekt BY 3E berücksichtigt werden.

3.2 Vernetzung außerhalb KW21

Die Ergebnisse der Batteriemessungen wurden im Rahmen des Projekts AZE, Analysezentrum für Elektromobilität an der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. durchgeführt [3].

Zusätzlich wurden Fahrprofile aus dem Projekt E-Flott [8], ebenfalls durchgeführt an der FfE, verwendet. Diese wurden für die detaillierte Batteriesimulation herangezogen.

4 Vorgehensweise und Methodik der Batterie- und Nutzersimulation

Die Batterie- und Nutzersimulation besitzt eine grundsätzlich andere Struktur als das EWi-Modell. In Abbildung 3 ist das Schema der Batterie- und Nutzersimulation dargestellt.



Abbildung 3: Schematische Darstellung der Batterie- und Nutzersimulation



Die durchgeführte Nutzersimulation soll ein realistisches Fahrverhalten von Elektrostraßenfahrzeugen nachbilden. Aus diesem Grund wurden reale Fahrprofile von Probanden aus dem Projekt eFlott [8] verwendet, die diverse Kriterien erfüllen mussten. Mittels dieser Kriterien wurden die besten zwei Probanden aus den vorhandenen Datensätzen selektiert, mit denen verschiedene Szenarien betrachtet wurden. Die dafür eingesetzten Ladeprofile stammen aus der Energiewirtschafts-Simulation.

Das Fahrzeugmodell wurde im Rahmen des Projekts AZE an der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. entwickelt und mittels detaillierter Messungen an einem Hybrid Fahrzeug (HEV und PHEV) validiert [9].

Das Batteriemodell entstand nach diversen Messungen an Batterien als auch Einzelzellen. Diese ermöglichten es, Aufschluss über den inneren Aufbau als auch das Verhalten der Batterien zu gewinnen und dieses Verhalten simulatorisch nachzubilden.

5 Projektergebnisse und Ausblick

Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse des Energiewirtschafts-Modells und der Batterie- und Nutzersimulation dargestellt.

5.1 Ergebnisse des Energiewirtschafts-Modells

Folgende zehn Punkte wurden als wichtigste Erkenntnisse der Energiewirtschafts-Simulation identifiziert:

- Die Simulationsergebnisse zeigen, dass eine Erweiterung der Lademöglichkeiten auf den Arbeitsplatz generell eine Harmonisierung der Ladelast bedeutet. Die benötigte Ladeenergie kann auf einen längeren Zeitraum verteilt werden, weshalb Ladespitzen reduziert werden. Ein weiterer positiver Effekt aus den häufigeren Lademöglichkeiten ist eine Verbesserung der Mobilität, die zu einer Reduzierung der Fahrdefizite bei manchen Nutzerklassen führt.
- 2. Eine Erhöhung der Ladeleistung pro Fahrzeug von 3 kW auf 9 kW hat lediglich bei den gesteuerten Lademodellen (Intra-Day und SRL) einen nennenswerten Einfluss auf dem Ladelastgang der Flotte. Deutlichere Auswirkungen zeigen sich anhand der Reduzierung der Fahrdefizite im Vergleich zum Laden mit 3 kW. Diese resultiert aus der Möglichkeit, das Fahrzeug schneller aufladen zu können und es so schneller wieder einsatzbereit zu machen.
- Eine Erhöhung der Ladeleistung von 9 kW auf 11 kW im Jahr 2030 führt zu keiner weiteren Verbesserung bzgl. der Fahrenergiedefizite der Flotte. Die Ladelast wird ebenso wenig beeinflusst.
- 4. Die zusätzliche Ladeleistung einer EV Flotte von 1 Mio. Fahrzeugen im Jahr 2020 hat nur einen marginalen Einfluss auf den Verbraucherlastgang. Das an der Strombörse für die Fahrzeuge zu beziehende Stromvolumen beträgt dann ca. 130 Mio. €. Der anteilige Energieverbrauch der Elektroautos am Gesamtverbrauch beträgt ca. 0,5 %.
- Die Folgen einer vergrößerten EV-Flotte im Jahr 2030 sind sehr viel weitreichender als die eines sukzessiven Rückgangs der Verbraucherlast im betrachteten Szenario. Der Jahresstromverbrauch steigt in diesem Jahr aufgrund der Flotte um 3,7 %.



- 6. Durch die Simulationsergebnisse wird deutlich, dass die Modelle "Ankauf im Intra-Day-Markt" und "negative SRL" den höchsten Grad an Flexibilität bieten.
- Die Betrachtung f
 ür das Jahr 2020 zeigt, dass das Lademodell "negative SRL" am preisg
 ünstigsten f
 ür die Nutzer ist. In diesem Jahr kann, bedingt durch die geringe Anzahl an EV, jedoch nur ein kleiner Prozentsatz am gesamten negativen SRL-Markt durch die EV abgedeckt werden.
- Im Gegensatz dazu bietet das Lademodell "Ankauf im Intra-Day-Markt" für das Jahr 2030 gegenüber dem Bezug negativer SRL finanzielle Vorteile. Das Volumen des SRL-Markts ist zu gering, um den erheblich größeren Energiebedarf der EV-Flotte im Jahr 2030 alleine decken zu können.
- 9. Das Laden im Intra-Day-Markt ruft hohe Gradienten in der Ladelast hervor. Der gleiche Effekt ergibt sich beim Abruf von SRL. Im Fall von SRL ist dieser Effekt gewünscht, da die Leistungssprünge zur Netzstabilisierung beitragen. Da die Rückwirkungen solcher Nachfragesprünge auf die Day-Ahead- und Intra-Day-Märkte nicht berücksichtigt wurden, ist es sehr wahrscheinlich, dass in der Realität entsprechende plötzliche Lastanhebungen bzw. -einbrüche geringer ausfallen werden.
- 10. "Preisoptimiertes Laden" führt zu einer Verbesserung der Integration von erneuerbaren Energien um 10 Prozentpunkte gegenüber dem Lademodell "Sofortladen".

Eine ausführliche Beschreibung der Ergebnisse des Energiewirtschafts-Modells kann dem Bericht [4] entnommen wurden.

5.2 Ergebnisse der Batterie- und Nutzersimulation

Die wichtigsten Ergebnisse der Batterie- und Nutzersimulation sind die Alterungsverläufe der Batterie und die darauf aufbauende monetäre Betrachtung.

Die Simulation wurde so lange fortgeführt, bis der SOH der Batterien auf 80 % gesunken war und damit das Ende der Lebenszeit erreicht wurde. Für die einzelnen Jahre der Simulation wurden dabei die Daten des Jahres 2020 (Temperatur, EEX-Preise) verwendet.

In Tabelle 1 ist für User 11 (Pendler, tägliche Strecke 24 km/d) und User 31 (Pendler, tägliche Strecke 90 km/d) die Lebenserwartung der Batterie beim Lademodell "Sofortladen" sowie die prozentuale Veränderung gegenüber den Lademodellen mit der jeweils schnellsten und langsamsten Alterung gegeben.

	Cofortladon	Schnellste Alterung	Langsamste Alterung
	Dauer in Jahre	Lademodell /	
		Veränderung zu Sofortladen	
Lloor 11	15.9 Johns	Lademodell "Preisoptimiert"	Lademodell "20 %"
User 11	15,6 Janie	-13 %	+21 %
User 31	14,5 Jahre	Lademodell "80 %" -30 %	Lademodell "Late" +15 %

Tabelle 1: Lebenserwartung der Batterie bei User 11 und User 31 für die Lademodelle mit der jeweils schnellsten und langsamsten Alterung im Vergleich zum Lademodell "Sofortladen"

Die Lademodelle bewirken eine Veränderung der Lebensdauer von -13 % bis +21 % (bei User 11) und von -30 % bis +15 % (bei User 31, vgl. Tabelle 1).

Bei User 11 führt das Lademodell "20 %" (Laden mit konstanter Leistung während der letzten 20 % des Ladefensters, ähnlich dem Lademodell "Late) zu einer Batterie-Lebensdauer von 19 Jahren oder 21 % mehr gegenüber der Referenz, während sich dieser Wert beim Lademodell "Preisoptimiert" (Laden Proportional zu den EEX-Preisen) auf 13,7 Jahre (-13 %) verringert.

Bei User 31 führt Lademodell "Late" zu einer Lebenszeit von knapp 17 Jahren (+15 %). Das Lademodell "80 %" (Laden mit konstanter Leistung während der letzten 80 % des Ladefensters, ähnlich dem Lademodell "Konstantladen") zu einer um 30 % kürzeren Lebenserwartung.

Allgemein lässt sich festhalten, dass die Lademodelle selbst nur einen geringen Einfluss auf die tatsächliche Alterung der Batterie haben. Allerdings machen sich auch diese geringen Unterschiede der Alterung, aufgrund der flachen Charakteristik der Alterung über die Zeit, über die gesamte Lebenszeit der Batterie jedoch bemerkbar. Die unterschiedlichen Lebenszeiten führen zwingend zu unterschiedlichen jährlichen Kosten für ein und dieselbe Batterie bzw. dasselbe Elektrofahrzeug.

5.3 Monetäre Betrachtung der Batteriealterung

Nachfolgend wird eine monetäre Betrachtung der Lademodelle dargestellt und ein Vergleich zur Benzin- und Dieseltechnologie geführt. Dabei ist es jedoch nicht das Ziel, eine genaue Kostenbetrachtung für das Jahr 2020 zu geben. Vielmehr sollen mittels eines groben Vergleichs die Potenziale der Elektromobilität und vor allem die Unterschiede der Lademodelle in Relation gezeigt werden.

Für die nutzerseitigen Kostenberechnungen werden verschiedene Annahmen bzgl. Batteriekosten, Kraftstoffkosten, Kraftstoffverbrauch, etc. getroffen, die näher in [6] beschrieben werden.

Verglichen werden die Strom- und Batteriekosten pro Jahr mit den Kraftstoffkosten konventioneller PKW. Anschaffungskosten werden dabei nicht betrachtet, weder für Elektrofahrzeuge ("Auto um die Batterie herum", evtl. Installation von Ladeinfrastruktur, Kommunikationsbedarf für die Ladesteuerung, etc...) noch für Benzin- und Dieselfahrzeuge. Ebenfalls werden Steuer, Wartung und sonst. Kosten nicht betrachtet. Alle Berechnungen werden in drei Szenarien (low, mid und high) durchgeführt mit denen niedrige, mittlere und hohe Preisentwicklungen für Batterie und Kraftstoff nachgebildet werden.

Nachfolgend werden die Kosten in €/Jahr für die Elektromobilität nach den Szenarien low, mid und high für User 11 (vgl. Abbildung 4) und User 31 (vgl. Abbildung 5) dargestellt. Ihnen sind jeweils die Kraftstoffkosten für Benzin und Diesel der jeweiligen Vergleichsfahrzeuge gegenübergestellt.





Abbildung 4: Jährliche Kosten in € für Batterie, Strom, Benzin und Diesel im Jahr 2020 für User 11



Abbildung 5: Jährliche Kosten in € für die Batterie, Strom, Benzin und Diesel im Jahr 2020 für User 31

Abbildung 4 und Abbildung 5 stellen die Batteriekosten (annuitätisch gerechnet über die jeweilige Lebenszeit einer Batterie bei gegebenem Lademodell mit einem Zins von 4 % p.a. und einer Inflationsrate von 2 % p.a.) und Stromkosten dar. Diese werden mit den reinen Kraftstoffkosten von Diesel und Benzin verglichen.

Bei beiden Usern zeigt sich eindeutig, dass die Kosten der Elektromobilität deutlich stärker von den Batteriekosten (dargestellt durch die Szenarien low, mid, high) als von den Einflüssen der Lademodelle abhängen. Trotzdem lassen sich bei User 11 ca. 13 % der Kosten durch Veränderung der Lademodalitäten (Lademodell "20 %" gegenüber Lademodell "Sofortladen") sparen. Das Lademodell mit der kürzesten Batterielebenszeit, das "Preisoptimierte" Lademodell, führt nur im Szenario mit sehr günstigen Batteriepreisen zu einer Netto-Reduktion der Kosten von 2 %. Ansonsten bewirkt die schnelle Alterung vielmehr eine geringe Kostensteigerung. Das bedeutet, dass die Kostenreduktion durch die Optimierung der Ladezeiten nach Energiepreisen in der gleichen Größenordnung wie die



Mehrkosten der Batterie, infolge von zusätzlicher Alterung aufgrund dieses Lademodells, liegt. Dementsprechend ist zu konstatieren, dass der zur Implementierung dieses Modells erforderliche, zusätzliche Aufwand an Kommunikationsinfrastruktur nicht gerechtfertigt ist.

Aus den Ergebnissen lässt sich also schließen, dass keine aufwendige Kommunikation im Auto für eine günstige Elektromobilität notwendig ist. Da die größten Kosten und damit auch die größten Einsparpotenziale eines Elektroautos bei der Batterie liegen, und da die kalendarische Alterung der einflussreichste Alterungseffekt ist, ist es aus wirtschaftlicher Sicht besser, die Batterie nicht sofort nach Fahrtende zu laden, sondern möglichst spät. Dabei ist die Ladeleistung relativ unwichtig; sie darf auch "hoch" sein. Dies liegt daran, dass selbst hohe Ladeleistungen, je nach Batteriekapazität zu relativ geringen Stromstärken (C-Raten) führen können. Bei User 31 entspricht beispielsweise das Laden mit einem dreiphasigen System (9 kW) einer C-Rate von unter 1 C. Selbst das Laden mit der dreifachen Leistung würde immer noch zu Ladeströmen kleiner 3 C führen, und somit auch einen sehr geringen Effekt auf die Alterung haben. Für die Realisierung dieses Lademodells würde im Prinzip eine "Zeitschaltuhr" reichen, mit der Aufgabe, das Laden automatisch in der Nacht zu starten.

Vorausgesetzt bei den durchgeführten Betrachtungen ist ein Batteriesystem mit einer entsprechend leistungsstarken Kühlung. Da die Temperatur einen großen Einfluss auf die Alterung der Batterie hat, muss ein Elektroauto, das mit 3 C geladen werden soll, über eine entsprechende Möglichkeit zur Wärmeabfuhr verfügen. Ansonsten würde sich evtl. schon bei 3 C die Alterung durch den Stromfluss und die daraus resultierende Erwärmung der Batterie deutlich bemerkbar machen. Aus eigenen Messungen und Erfahrungen lässt sich sagen, dass diese Problematik auch bei aktuellen Elektroautos besteht, und es vor allem im Sommer zu Wärmestau in der Batterie kommen kann.

Aus Abbildung 4 und Abbildung 5 ist ebenfalls erkennbar, dass die Kosten für Batterie und Strom in der gleichen Größenordnung liegen wie die Kosten für die Treibstoffe Benzin und Diesel. Würden die restlichen Kosten (Steuern, Wartung, Fahrzeugkosten ohne Batterie etc.) für Elektroautos und konventionelle PKW in der gleichen Größenordnung liegen, könnten im Jahr 2020 Elektroautos wirtschaftlich in direkte Konkurrenz zur herkömmlichen Technologie treten.

Ein wesentliches Ergebnis aus /EWI07 10/ ist der Einfluss der gefahrenen Jahreskilometer auf die Kosten von Elektroautos. Je mehr gefahren wird, desto günstiger sind diese gegenüber Diesel- oder Benzinfahrzeugen. Dieser Effekt konnte hier ebenfalls zwischen User 11 und User 31 beobachtet werden, und liegt nicht direkt an den gefahrenen Jahreskilometern, sondern an der Relation von verbrauchter Energie pro Jahr zu Batteriekapazität (*kWh*_{Verbrauch}/a zu *kWh*_{Batt}), und somit der Relation zwischen bezahlter Batteriegröße und ihrer Ausnutzung. Dadurch wird die "Ausnutzung" des wirtschaftlichen Potenzials von Elektroautos definiert.



6 Wesentliche terminliche und inhaltliche Abweichungen zum Projektantrag

Das Projekt wurde innerhalb der kostenneutralen Projektverlängerung erfolgreich abgeschlossen.

Der im Antrag dargestellte Lösungsweg konnte bis zum Ende des Projekts für das Erreichen der Projektziele beibehalten werden.

7 Publikationen und Patente

7.1 Im Rahmen des Projektes entstandene Publikationen

7.1.1 Begutachtete Publikationen

Es wurden keine begutachteten Publikationen veröffentlicht.

7.1.2 Nicht-begutachtete Publikationen

- [1] Mezger, Tomás et al.: Analysis of the potential for the integration of an EV fleet into the power grid in: 11th IAEE European Conference on Energy Economy, Policies and Supply Security, 25-28 August 2010. Vilnius: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), 2010
- [2] Köll, Lorenz; Mezger, Tomás: Ladeprofile und Ladeleistungsbedarf von Elektrostraßenfahrzeugen in: Energiewirtschaftliches Seminar (EWS), 20. Juli 2009 am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, TUM. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), 2009
- [3] Mezger, Tomás; Nobis, Philipp: Endbericht der Batteriemessungen im Rahmen des Projekts AZE. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), 2011
- [4] Mezger, Tomas; Rasilier, Thomas: Energiewirtschaftliche Betrachtung von Lademodellen f
 ür Elektroautos - Zwischenbericht zum Projekt KW21 BY 2E -Einsatzm
 öglichkeiten von Elektroautos zum Lastmanagement. M
 ünchen: Forschungsstelle f
 ür Energiewirtschaft e.V. (FfE), 2012
- [5] Mezger, Tomás: Potenzialanalyse für die Einbindung einer Flotte von Elektrofahrzeugen in das Elektrizitätsnetz in: FfE-Fachtagung 2011: Energieeffizienz eine Herausforderung an Wissenschaft und Praxis. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), 2011
- [6] Mezger, Tomás; Brüggemann, Marcus: Detaillierte Betrachtung von Lademodellen für Elektroautos - Endbericht zum Projekt KW21 BY 2E - Einsatzmöglichkeiten von Elektroautos zum Lastmanagement. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), 2012 (laufend)



7.2 Gemeinsame Publikationen zweier oder mehrerer KW21 Teilprojekte

Es wurden keine gemeinsamen Publikationen zusammen mit anderen KW21-Teilprojekten veröffentlicht.

7.3 Weitere Publikationen

- Blank, Tobias: Elektrostraßenfahrzeuge Elektrizitätswirtschaftliche Einbindung von Elektrostraßenfahrzeugen. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), 2007
- [8] Mauch, Wolfgang Prof. Dr.-Ing.; Nobis, Philipp Dipl.-Ing.; Pellinger, Christoph Dipl.-Phys.; Staudacher, Thomas Dipl.-Phys.; Hener, Heinrich; Knodt, Janina; Koppelt, Kristoffer; Schwerd, Stephan; Pfrogner, Magnus; Münst, Christopher; Wimmer, Patrick: eFlott Wissenschaftliche Analysen zur Elektromobilität. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), 2011
- Köll, Lorenz; Mezger, Tomás; Rasilier, Thomas; Fischhaber, Sebastian: Endbericht der Fahrzeugmessungen im Rahmen des Projekts AZE. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), 2011

7.4 Im Rahmen des Projektes entstandene Patente

Im Rahmen des Projektes sind keine Patente entstanden.

8 Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses

8.1 Studentische Mitarbeiter

A. P. Pascual	Ermittlung von Alterungseffekten bei Li-Ion Batterien	
M. Puhlmann	Programmierung des EWi-Modells (Praktikum)	
R. Kalai	Prognose über Batteriepreisentwicklung (Praktikum)	
S. Eller	Allgemeine Literaturrecherche	
Th. Mezger	Wirtschaftlichkeitsberechnung	
T. Rasilier	Entwicklung der Batteriesimulation	
X. Zhou	Erarbeitung der Grundlagen für das Simulationsmodell	
M. Brüggemann	Durchführung von Batteriemessungen	
S. Koppenleitner	Durchführung von Batteriemessungen	

8.2 Studien-, Semester- und Bachelorarbeiten

 V. Schröpel Ermittlung und Bewertung von Lademodellen für Elektrostraßenfahrzeuge
 M. Puhlmann Simulationsgestützte Analyse möglicher Beiträge der Elektromobilität zur Integration der regenerativen Energien in das deutsche Stromnetz



8.3 Diplom- und Masterarbeiten

S. Anders	Erstellen eines messtechnisch gestützten Modells zur Bestimmung der Alterung von LiFePO ₄ -Zellen
C. Döttling	Erstellung eines Modells zur Analyse der Einsatzmöglichkeiten von Elektrofahrzeugen
M. Brüggemann	Entwicklung und Verifizierung eines Simulationsmodells einer Li-Ionen-Batterie

8.4 Promotionen

T. Mezger Messtechnisch gestützte Simulation der Alterungsmechanismen von Li-Ion-Batterien für Elektrostraßenfahrzeuge (laufend).

9 Forschungsprogramme des Bundes und der EU

9.1 Angaben, ob weitere Drittmittel zum Projektthema eingeworben wurden, insbesondere aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen des Bundes und der EU

An der Forschungsstelle für Energiewirtschaft werden die zwei KW21-Projekte "Einsatzmöglichkeiten von Elektrostraßenfahrzeugen zum Lastmanagement (BY 2E)" und "Simulationsgestützte Prognose des elektrischen Lastverhaltens (BY 3E)" bearbeitet. Weitere kraftwerksrelevante Forschungsvorhaben sind:

EnEff:Stadt: Chancen und Risiken von KWK im Rahmen des IEKP

Konjunkturpaket II: Modellregion Elektromobilität München

Konjunkturpaket II: Flottenversuch eFlott

Förderinitiative Energiespeicher: Merit-Order der Energiespeicher im Jahr 2030

9.2 Geplante Antragsstellung bzw. künftige Förderung aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen von Bund, EU etc. sowie allgemeinen Förderprogrammen (z.B. DFG)

Schaufenster Elektromobilität: Ausgezeichnet Taxifahren

Schaufenster Elektromobilität: Infrastruktur- und Mobilitätslösungen in verdichteten Siedlungsgebieten

Modellkommune für Elektromobilität Garmisch-Partenkirchen: Smart Grid – Basis für eine elektromobile Zukunft

Modellkommune für Elektromobilität Garmisch-Partenkirchen: Untersuchung des Kundenannahmeverhaltens zur Integration von Erneuerbarer Energie in Elektrofahrzeuge innerhalb der e-GAP Modellkommune Garmisch-Partenkirchen

ITZB: Lademanagement Buchloe



Arbeitskreis Energiewirtschaft

Projekt: BY 3E

Simulationsgestützte Prognose des elektrischen Lastverhaltens bis 2030

Projektleiter:	Prof. DrIng. Wolfgang Mauch Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.
Mitarbeiter:	DiplIng. Thomas Gobmaier
	DiplIng. Michael Beer
	DrIng. Serafin von Roon
	DiplPhys. Tobias Schmid
	DiplIng. Tomás Mezger
	DiplPhys. Roger Corradini
	DiplIng. Philipp Pfeifroth
	Sebastian Hohlenburger
Finanzierung:	E.ON Energie AG
	Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst (StMWFK)
	Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur. Verkehr und Technologie (StMWIVT)

1 Ausgangssituation

Für Planung und Auslegung zukünftiger Kraftwerke sowie zur Beurteilung der Notwendigkeit von Speichersystemen werden möglichst genaue Lastgangprognosen der Verbraucherlast benötigt. Je detaillierter die Prognosen sind, desto besser können die darauf aufbauenden Arbeiten die Zukunft der Energieversorgung abbilden.

Für einen Teil der Verbrauchergruppen existieren Referenz-Lastgänge, wie z.B. die VDEW Standard-Lastprofile der BTU Cottbus. Studien zur systematischen Erarbeitung zukünftiger Lastgänge für alle Verbrauchergruppen sind nicht vorhanden.



Der zukünftige Jahresenergiebedarf wurde bereits in Studien verschiedener Institute betrachtet. In dem Projekt "Energiezukunft 2050" [15] wurde für Deutschland der Endenergiebedarf bis zum Jahr 2050 durch Veränderung der Bedarfsvektoren detailliert untersucht.

Zukünftige Lastgänge werden meist auf Basis von historischen Lastgängen mittels Skalierung an den erwarteten Jahresenergieverbrauch des Zieljahres erstellt. Heute absehbare und zum Teil schon sichtbare Trends mit starkem Einfluss auf die zeitliche Verteilung der Energie – wie z.B. der Wegfall von Nachstromspeicherheizungen, das Laden von Elektrostraßenfahrzeugen oder die verbraucherseitige Lastbeeinflussung mittels smart meter – sind im Jahresenergieverbrauch jedoch nicht enthalten. Dadurch fehlt ein großer Teil dieser Trends bei bisherigen Untersuchungen des zukünftigen Verbraucherlastgangs, was die Aussagekraft dieser Studien verringert.

2 Projektziele

In dem Projekt "Simulationsgestützte Prognose des elektrischen Lastverhaltens bis 2030" wurde ein Energieverbrauchsmodell entwickelt, welches einen zukünftigen Verbraucher-Stromlastgang generieren kann. Um die Ergebnisse für eine breitere Anwenderschicht nutzbar zu machen und um den Einsatz von Lastmanagementsystemen mit dynamischer Reaktion auf äußere Anreize wie z.B. die Strompreise untersuchen zu können, wurde darüber hinaus auch die residuale Last berechnet.

Um den Detaillierungsgrad zu erhöhen und um Verbraucherlastgänge für verschiedene räumliche Bilanzgrenzen (z.B. Bundesländer, Städte) generieren zu können, erhält das Modell regionale Informationen.

Die zukünftig möglichen Änderungen der Lastgänge werden über eine Trendanalyse quantifiziert; durch Szenarienrechnung soll die mögliche Bandbreite der Auswirkungen der Trends auf die Verbraucherlastgänge gezeigt werden.

2.1 Umsetzung der Hinweise aus den bisherigen Begutachtungen

In dem Zwischengutachten vom 17. März 2011 wurde empfohlen, im Abschlussbericht die Informationsquellen und Annahmen (z.B. bezüglich Einzellastgängen und Lastgängen bei DSM, intelligenten Geräten) gut zu dokumentieren. Dies wurde umgesetzt, indem ein ausführlicher Abschlussbericht mit ca. 110 Seiten – zusätzlich zu diesem Bericht – erstellt wurde.

Der Empfehlung der Gutachter zur kostenneutralen Verlängerung um 3 Monate wurde mit einer Verlängerung um 6 Monate entsprochen. Die Verlängerungsdauer wurde erhöht, um Zeitproblemen prophylaktisch vorzubeugen.



3 Vernetzung

3.1 Vernetzung innerhalb KW21

Das Projekt BY 3E ist eng mit den Projekten BY 2E "Ladelastgänge in Abhängigkeit der Geschäftsmodelle" und BY 1E "Integration und Bewertung erzeuger- und verbraucherseitiger Energiespeicher" verknüpft.

Um die Ergebnisse der Arbeiten aller BY E und BW E gegenseitig nutzen zu können, wurden in einem ersten Schritt gemeinsame Rahmenbedingungen abgestimmt und allen Projekten des Arbeitskreises Energie zur Verfügung gestellt.

Die Verfügbarkeit und die von den Kosten abhängige Anwendung von Stromspeichern – z.B. im Rahmen von Demand-Side Management oder Demand Response – kann einen großen Einfluss auf die Verbraucherlastgänge (besonders Haushalte) haben. Da bei 3E keine Betrachtung der Kosten durchgeführt wird, sind die Ergebnisse von 1E eine wichtige Größe, um die zukünftige Anzahl und die Häufigkeit des Eingriffs von intelligenten Stromverbrauchern in die Last abschätzen zu können. Demgegenüber sind Verbraucherlastgänge, wie sie in 3E entwickelt werden, wichtige Eingangsgrößen für das in 1E genutzte Modell zur Kraftwerks- und Speicherausbauplanung "Imakus".

Der Ladelastgang von Elektrostraßenfahrzeugen wird zukünftig einen steigenden Anteil am Haushaltsstromverbrauch ausmachen. Hier werden mit 2E die Vor- und Nachteile sowie die Hemmnisse verschiedener Lademodelle diskutiert und an die Szenarien von 3E angepasst. Der Verbraucherlastgang bzw. die Residuallast sind in 2E ein Indikator für den Strompreis und die Netzbelastung, wodurch sich Aussagen zu den Kosten des Strombezugs bei verschiedenen Lademodellen treffen lassen.

Aus der ersten KW21-Phase werden die Ergebnisse der Teilprojekte E2 (KWK) und E3 (KWK und reg. Energien) genutzt.

Im Rahmen des Projektes wurden mehrere Vorträge zu dem Thema und zu dem Teilaspekt der schaltbaren Lasten (DSM/DR) gehalten, welche Initiator zum wissenschaftlichen Austausch mit vielen anderen Projekten (Studienarbeiten bis Dissertationen) waren.

3.2 Vernetzung außerhalb KW21

Die Themen Lastprofile und DSM/DR wurden im Rahmen von Tagungen und Projekttreffen sowie im Rahmen von anderen Projekten im Haus diskutiert, Ergebnisse wurden ausgetauscht und validiert.



4 Vorgehensweise und Methodik

Ziel des Projektes war die Generierung von Verbraucherlastgängen für elektrischen Strom bis zum Jahr 2030. Hierzu wurde zuerst ein Referenzlastgang ermittelt, der typisch für den heutigen Stromverbrauch ist. Dann wurde ein Modell des aktuellen Verbraucher-Stromlastgangs "Bottom-Up" auf Basis von Lastgängen einzelner Geräte, Gewerke oder Branchen generiert (mittlerer Pfad in Abbildung 1). Die Validierung des Modells erfolgte "Top-Down" mit den Referenzlastgängen der jeweiligen Regionen bzw. Deutschlands. Zur Erweiterung des Ergebnisraumes werden Szenarien erstellt, die unterschiedliche gesellschaftlich/technische Entwicklungspfade beinhalten. Im Rahmen einer Trendanalyse wurden die Trends mit den stärksten Auswirkungen auf den zukünftigen Verbraucherlastgang identifiziert und analysiert. Die Quantifizierung der Auswirkungen dieser Trends für die Jahre bis 2030 wurde in das Modell integriert, wodurch das Modell den zukünftigen Stromlastgang generieren kann. Ergebnis sind die statischen Verbraucherlastgänge für Strom bis zum Jahr 2030.



Abbildung 1: Skizzierung der Methodik

Mittels aktueller Einspeiselastgänge von regenerativen Energieerzeugern und Must-Run Anlagen (z.B. KWK) sowie den Ausbauszenarien dieser Energieerzeuger wird zusätzlich der Residuallastgang für die Stützjahre berechnet. Diese wird als Indikator für den Einsatz von schaltbaren Verbrauchern (Smart Grid, Laden von Elektrostraßenfahrzeugen) genutzt. Mit dem Einsatz der schaltbaren Lasten ergibt sich der dynamische Verbraucherlastgang, welcher gegenüber dem heutigen Lastgang – mit einander sehr ähnlichen Wochenprofilen – eine deutlich stärkere Abhängigkeit von der Stromverfügbarkeit bzw. dem Strompreis zeigt.



5 Projektergebnisse und Ausblick

Energieverbrauch und Anteil der regenerativen Energien der drei Szenarien basieren dabei auf den mit den KW21 Energieprojekten abgestimmten Rahmendaten:

- Basis-Szenario "business as usual" (BAU): Zukünftige Entwicklung "business as usual", 60 % Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch im Jahr 2050 bei steigendem Bruttostromverbrauch (ca. 1 % bis 2030). Abbildung der reinen Trends.
- Szenario 2 (DSM/DR):

Aufzeigen der Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes schaltbarer Lasten. 80 % Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch im Jahr 2050 bei sinkendem Bruttostromverbrauch (ca. -6 % bis 2030). "Grünes Szenario, obwohl nicht alle Effizienzmaßnahmen greifen".

 Szenario 3 (Autarkie): Energieverbrauch wie Szenario 2, 100 % regenerative Energieerzeugung im Rahmen einer Energieautarkie, Einsatz schaltbarer Lasten abhängig von der regionalen Stromverfügbarkeit, Betrachtung von zwei Regionen.

Als weitere Variation wurde geprüft, wie die Lastgänge sich entwickeln, wenn sich die Elektromobilität nicht durchsetzt (womit der größte Einflussfaktor auf die Stromlastgänge wegfällt und andere Einflussfaktoren sichtbar werden).

Die Szenarien BAU (business as usual) und DSM/DR (Grenzen des Einsatzes schaltbarer Lasten) werden zuerst vergleichend gegenüber gestellt, die Betrachtung der Autarkie erfolgt danach.

5.1 Statische Verbraucherlast

In Abbildung 2 sind die Verbraucherlastgänge für das Szenario DSM/DR exemplarisch für eine Winterwoche dargestellt. Im linken Bild mit Elektromobilität erkennt man die abendliche Ladespitze der Elektrofahrzeuge, welche von 2020 auf 2030 deutlich zunimmt. Die durch das ungesteuerte Laden von Elektrofahrzeugen generierten Lastspitzen erreichen im Jahr 2030 das Niveau der heutigen Spitzenlasten.

Durch die Reduktion des Jahresenergieverbrauchs liegt der Lastgang des Jahres 2030 deutlich unter dem heutigen. Im Fall ohne Elektromobilität ist das Abflachen der morgendlichen und abendlichen Verbrauchsspitzen zu erkennen, welche unter anderem von veränderten Schichtmodellen in der Industrie als auch von unregulierten Ladenöffnungszeiten verursacht wird. Weitere Unterschiede ergeben sich durch die Trends und die unterschiedlichen Wetterdaten (TRY heute, TRY2020 und TRY2030). Da auch im ungesteuerten Fall ein Teil der Fahrzeuge tagsüber und nachts geladen wird, liegt der Lastgang mit Elektromobilität auf einem etwas höheren Niveau.





Abbildung 2: Statische Verbraucherlast für das Szenario DSM/DR für eine Winterwoche (links mit und rechts ohne Elektromobilität)

5.2 Residuale Last

Die residuale Last entspricht der Last, die vom konventionellen Kraftwerkspark gedeckt werden muss, und ergibt sich aus der Differenz aus Verbraucherlast und regenerativer Einspeisung (sowie KWK). Sie wird auch als Indikator für den Strompreis genutzt und trägt somit zur Einsatzplanung (Dynamisierung) der schaltbaren Lasten bei.

Im Folgenden werden alle Auswertungen mit und ohne Dynamisierung – also dem Einsatz der schaltbaren Lasten (DSM oder DR) – dargestellt, um die Einflussmöglichkeiten von schaltbaren Verbrauchern auf den Lastgang zu zeigen und dem Leser eine Abschätzung der Auswirkungen bei mehr oder weniger schaltbaren Lasten zu ermöglichen. Bei der Dynamisierung wurde vereinfachend die residuale Last als Indikator für den Strompreis genutzt; eine hohe residuale Last ergibt einen hohen Strompreis und somit eine hohe Motivation für eine Verschiebung des Verbrauchs in eine Stunde mit geringerer residualer Last. Ein Teil der schaltbaren Lasten zur Glättung der residualen Last.

Die maximale residuale Last in Abbildung 3 zeigt im Szenario BAU, dass trotz höherer regenerativer Einspeisung die statische residuale Last im Jahr 2030 höher liegt als im Jahr 2020 – dies ist auf den verstärkten Einsatz der Elektromobilität zurückzuführen. In der rechten Darstellung mit den Lasten ohne Elektromobilität ist eine jährlich sinkende maximale Last zu sehen. Generell ist zu bemerken, dass sich der Ausbau der erneuerbaren Energien nur in geringem Maße auf die maximale residuale Last auswirkt, da es immer verbraucherseitige Hochlaststunden gibt, in denen kaum regenerative Einspeisung vorhanden ist. Die minimale Verbraucherlast wird hingegen stark vom regenerativen Ausbau und den damit verbundenen Einspeisespitzen beeinflusst. So steht einer Lastreduktion (2030 DSM/DR) von 17,2 GW der maximalen Last gegenüber heute eine Reduktion der minimalen Last um 67,2 GW gegenüber.

Wie erwartet senkt die Dynamisierung die Spitzenlast und erhöht die minimale Last. Im Szenario DSM/DR im Jahr 2030 tragen die schaltbaren Lasten zu einer Reduktion der Spitzenlast um über 10 GW bei. Die minimale residuale Last, also die regenerative Überspeisung, wird im Gegenzug um bis zu 12 GW erhöht.



Abbildung 3: Maximale residuale Last, links mit Elektromobilität und rechts ohne Elektromobilität

Die Reduktion der Spitzenlast im Szenario DSM/DR im Jahr 2030 um 13 % deckt sich auch mit Ergebnissen der Studie "Coordination of Energy Efficiency and Demand Response" der Berkeley labs [16]. Dort wird davon ausgegangen, dass in den USA bis zum Jahr 2019 eine Reduktion der sommerlichen Spitzenlast um 14 % möglich wäre, bis zum Jahr 2030 je nach monetärem Anreiz 14 % bis 20 %.

5.3 Dynamische Verbraucherlast

Aus der residualen dynamischen Last kann die Verbraucherlast rückgerechnet werden, indem die regenerative Einspeisung auf die residuale Last addiert wird. Die Verbraucherlast ist ein Indikator für die von den Stromnetzen aufzunehmende Last.

In Abbildung 4 ist die Verbraucherlast mit Elektromobilität für das Szenario BAU links und für DSM/DR rechts dargestellt. Im Vergleich zwischen statischer und dynamischer Verbraucherlast zeigt sich bei jedem Lastgang eine Verbrauchsspitze, allerdings zu unterschiedlichen Tageszeiten. Die beim statischen Verbraucherlastgang durch das Laden der Elektrofahrzeuge generierte Abendspitze wird durch das gesteuerte Laden größtenteils in die Nachtstunden verlegt, was zu diesen Zeiten die Grundlast erhöht. Durch die hohe PV-Einspeisung verlagern viele schaltbare Verbraucher, unter anderem auch die an der Arbeitsstelle geladenen Elektrofahrzeuge, ihre Last in die Mittagsstunden, was beim dynamischen Lastgang eine neue Mittagsspitze generiert.



Abbildung 4: Statische und dynamische Verbraucherlast einer Winterwoche mit Elektromobilität



Die maximale und minimale Verbraucherlast mit Elektromobilität sind in Abbildung 5 dargestellt. Die maximale Verbraucherlast zur heutigen Zeit würde durch schaltbare Verbraucher reduziert – da heute residuale Last und Verbraucherlast noch korrelieren, führt eine Glättung der residualen Last auch zu einer Glättung der Verbraucherlast, mit Reduktion der Spitzenlast und Erhöhung der minimalen Last. Durch den Ausbau der regenerativen Energieerzeuger geht diese Korrelation verloren, wodurch eine Glättung der residualen Last – z.B. durch Verschiebung von Lasten in eine PV Einspeisespitze – den gegenteiligen Effekt im Verbraucherlastgang generiert. So führt die Dynamisierung in Zukunft zu einer Erhöhung der maximalen und zur Reduktion der minimalen Verbraucherlast. Im Szenario BAU führt dies zu einer Erhöhung der Verbraucherlast auf über 95 GW (+20 % gegenüber heute), wodurch die Netze zukünftig stärker belastet werden. Im Szenario DSM/DR ist die Dynamisierung zwar stärker, doch durch den im Gesamten niedrigeren Stromverbrauch ist auch die Last geringer und erreicht (durch die Dynamisierung) etwa das heutige Niveau.



Abbildung 5: Maximale und minimale Verbraucherlast mit Elektromobilität

5.4 Untersuchung der Autarkie

In der öffentlichen Diskussion wird neben der Wärmeautarkie auch häufig die Stromautarkie als kommunales Ziel genannt. Zur Prüfung der Vor- oder Nachteile wurde im Szenario Autarkie für zwei Regionen mit unterschiedlichen Anteilen regenerativer Techniken analysiert, welche Auswirkungen eine Energieautarkie auf die residuale Last (entsprechend dem Ausgleich mit dem Verbundnetz, wenn keine lokalen Speicher vorhanden sind) und die Verbraucherlast (entsprechend der lokalen Netzbelastung) hat. Um die Ergebnisse der zwei Regionen mit den anderen Szenarien vergleichen zu können, wurde der Verbraucherlastgang des Szenarios DSM/DR 2030 als Basis genutzt. Die regenerativen Einspeisegänge wurden so skaliert, dass die Jahresenergiemenge dem Jahresverbrauch entspricht (Energieautarkie). Das Ergebnis sagt aus, wie sich der deutsche Gesamtlastgang ändert, wenn die regenerative Energieerzeugung eine Charakteristik wie die Netzregionen Südbayern oder Schleswig-Holstein hat.

Bei Betrachtung der Verbraucherlast (vgl. Abbildung 6) zeigt sich wiederum, dass der Einsatz schaltbarer Lasten durch Glättung der residualen Last zu höheren Verbraucherlasten führt. Im Falle der Energieautarkie und der damit verbundenen lokalen Einspeisecharakteristik zeigen sich höhere Verbraucherlasten als im Szenario DSM/DR mit geringerem Anteil regenerativer Energien und großräumigeren Verteilung der regenerativen Energieerzeuger. So liegt die maximale Verbraucherlast mit dem windreichen Erzeugergang der



Region 21 (Schleswig Holstein) um ca. 10 % höher als im vergleichbaren Szenario DSM/ DR für das Jahr 2030, und mit dem Erzeugergang mit viel PV-Anteil (wie Südbayern) um 28 %, was für ein vorhandenes Netz eine deutliche Mehrbelastung darstellt.



Abbildung 6: Vergleich der maximalen und minimalen Verbraucherlast

Es hat sich gezeigt, dass die Autarkiebestrebung zu keiner nennenswerten Verringerung der Netzbezugsleistung führt. Je geringer die räumliche Verteilung der regenerativen Energieerzeuger ist, desto weniger gleichen sich einzelne Fluktuationen aus, was zu hohen Lastspitzen und -gradienten führt. Durch das Verbundnetz können Schwankungen in der Energieerzeugung und im Energieverbrauch ausgeglichen werden, wodurch auch der gegensätzliche Einsatz schaltbarer Lasten vermieden wird.

5.5 Fazit und Ausblick

Das Projekt hat gezeigt, dass die Ladestrategie von Elektrostraßenfahrzeugen den stärksten Einfluss auf den zukünftigen Lastgang haben kann. Unter den Annahme, dass bedingt durch den Ausbau der erneuerbaren Energieerzeugung die Strompreise zukünftig höhere Fluktuationen aufweisen werden, ist anzunehmen, dass sich spezielle Ladeverträge für gesteuertes Laden von Elektrofahrzeugen durchsetzen.

Die mit dem Klimamodell REMO ermittelten Klimadaten zeigen zukünftig für Deutschland einen verringerten Heizwärmebedarf und einen höheren Kältebedarf; die Stromerzeugung der erneuerbaren Energien wird durch die Klimaverschiebung aber kaum beeinflusst.

Es hat sich gezeigt, dass nur ein Teil der schaltbaren Lasten einen Einfluss auf den Verbraucherlastgang haben wird, da für die anderen Lasten der Einsatz als Regelleistung vom Kosten/Nutzen Verhältnis deutlich attraktiver ist. Eine mögliche Energieautarkie bringt hingegen nur eine geringe Netzentlastung und führt dazu, dass schaltbare Lasten in verschiedenen Regionen gegensätzlich eingesetzt werden.

Je stärker schaltbare Lasten zukünftig zur Glättung der residualen Last und damit zur Nutzung von regenerativen Einspeisespitzen beitragen, desto stärkere Verbrauchsspitzen



werden generiert. Einen Teil der schaltbaren Lasten zur Netzentlastung einzusetzen, wenn gleichzeitig andere schaltbare Lasten in die regenerativen Einspeisespitzen verschoben werden, ist nicht zielführend. Damit stellt sich die Frage, welche Lösung die gesamtwirtschaftlich Beste wäre: Verschiebung der Lasten mit Netzausbau, die lokale Zwischenspeicherung der Energie oder eine Androsselung der Erzeugungsspitzen.

Für Betrachtungen zu Weiterbetrieb, Bau oder Stilllegung von Kraftwerken und Speichern werden Prognosen für den Stromverbrauch und die Einspeisung regenerativer Energien benötigt, um Investitionsanreize erkennen und Fehlinvestitionen vermeiden zu können. Durch den Stromhandel ist jedoch auch die Betrachtung der umliegenden Staaten notwendig, um solide Aussagen treffen zu können. Mittlerweile sind einige Projekte gestartet, welche für alle an das Verbundnetz angeschlossene Länder den Kraftwerkspark und den regenerativen Ausbau untersuchen. So wäre als nächster Schritt die Untersuchung des Verbraucherlastgangs dieser Länder eine sinnvolle Weiterführung des Projektes.

6 Wesentliche terminliche und inhaltliche Abweichungen zum Projektantrag

In dem Projektantrag wurden die Auswirkungen des Klimawandels ausgeschlossen, da es keine belastbaren Daten zum zukünftigen Klima in Deutschland gab. Auf Wunsch des Auftraggebers wurde die Klimaerwärmung als großer Trend nachträglich aufgenommen. Hierzu mussten eine Methodik zur Einbindung von zukünftigen Klimadaten entwickelt und Testreferenzjahre nach DIN 15927 auf Basis des globalen Klimamodells REMO erstellt werden. Dadurch verzögerte sich das Projekt um ca. 2 Monate. Die Generierung der Lastgangmodule und der zukünftigen Module wird durch die Einbindung von individuellen regionalen Wetterdaten für alle Stützjahre deutlich aufwändiger.

In Expertengesprächen hat sich gezeigt, dass die ursprünglich als Basis für den Verbraucherlastgang geplante "vertikale Netzlast" nicht dafür geeignet ist. Die intensive Analyse der ENTSO-E Verbraucherlast zeigte, dass eine grundsätzliche Eignung vorhanden ist. Dies verzögerte die Fertigstellung mehrerer Meilensteine um bis zu vier Monate.

Diese ungeplanten Arbeitspakete führten zu einer budgetneutralen Verlängerung der Projektlaufzeit bis Juni 2012, das Projekt wurde termingerecht abgeschlossen.

Die Anwendbarkeit der Ergebnisse stieg durch die Implementierung der Klimaerwärmung erheblich. Durch die Wahl eines alternativen Basis-Verbraucherlastgangs stieg die Qualität der Arbeit, da eine bessere Datengrundlage zur Validierung vorliegt.

7 Publikationen und Patente

7.1 Im Rahmen des Projektes entstandene Publikationen

7.1.1 Begutachtete Publikationen

 Roon, S.; Gobmaier, T.; Huck, M.: Demand-Side Management in Haushalten – Analyse des praktischen Potenzials zur Bereitstellung von Reserveleistung. 11. Symposium Energieinnovation (EnInnov2011) der TU Graz, ISBN 9783851250824, Februar 2010, Graz/Austria



- [2] Roon, S.; Gobmaier, T.; Huck, M.: Demand-Side Management in Haushalten Potenziale und Hemmnisse f
 ür kurzfristige Leistungsbereitstellung. BWK, Ausgabe 06/2010, Springer-VDI-Verlag GmbH, D
 üsseldorf
- [3] Gobmaier, T.; Schmid, T.: Simulationsgestützte Prognose des elektrischen Lastverhaltens bis 2030. 7. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien (IEWT Wien), Februar 2011
- [4] Gobmaier, T.; Bernhard, D.; Roon, S.: Markets for Demand-Side Management.
 12. Symposium Energieinnovation (EnInnov2012) der TU Graz,
 ISBN 9783851252002, Februar 2012, Graz/Austria

7.1.2 Nicht-begutachtete Publikationen

- [5] Gobmaier, T.; John, C.; Pfeifroth, P.: Entwicklung der Lastgänge des Stromverbrauchs bis 2030. bdew AG I "Ermittlung der Effizienzpotenziale auf der Nachfrageseite", am 24. März 2010, Berlin
- [6] Gobmaier, T.; Roon, S.: Energiespeicherung mit Haushaltsgeräten Potenziale, Hemmnisse und Kosten verschiedener Möglichkeiten zur Bereitstellung von Reserveleistung. DKV Vortragsveranstaltung am 14. September 2010, TU Berlin, Hermann-Rietschel-Institut, Berlin
- [7] Gobmaier, T.: Standardlastprofile f
 ür Kunden mit Elektrostra
 ßenfahrzeugen. Fachartikel auf der FfE-Internetseite, http://www.ffe.de/wissenffe/artikel/316standardlastprofile-fuer-kunden-mit-elektrostrassenfahrzeugen, 2010
- [8] Gobmaier, T.; Schröpel, V.: Analyse des Zusammenhangs zwischen Strompreis und CO2-Emissionen. Fachartikel auf der FfE-Internetseite, http://www.ffe.de/ wissenffe/artikel/322, 2010
- [9] Roon, S.; Gobmaier, T.; Huck, M.: Demand Side Management in Haushalten -Methoden zur Potenzialanalyse und Kostenabschätzung. Fachartikel auf der FfE-Internetseite, http://www.ffe.de/wissenffe/artikel/296-demand-sidemanagement, 2010
- [10] Gobmaier, T.; Schröpel, V.: Emissionsreduktion durch Smart Meter. Informationsdienst Wissenschaft, http://idw-online.de/pages/de/news385082, 2010
- [11] Roon, S.; Gobmaier, T.: Konzepte zur Lastreaktion in der deutschen Industrie. In: BWK Bd. 63 (2011) Nr. 3. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 2011
- [12] Roon, S.; Gobmaier, T.: Flexible Verbraucher Laststeuerung für mehr Balance im Stromnetz. Zeitschrift e.21 – energie für morgen, Ausgabe 2. Essen: ener|gate gmbh & co. kg, April 2011
- [13] Gobmaier, T.; Gruber, A.: Demand Response in der Industrie. 2. Deutsches Demand Side Management Symposium am 09.11.2011 im Rahmen der 6. Woche der Energie an der HAW Hamburg
- [14] Gobmaier, T.: Simulationsgestützte Prognose des elektrischen Lastverhaltens bis 2030. Energiewirtschaftliches Seminar des Lehrstuhls für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der TU München, Sommersemester 2012



7.2 Gemeinsame Publikationen zweier oder mehrerer KW21 Teilprojekte

Es wurden mit anderen KW21 Projekten keine gemeinsamen Publikationen erstellt

7.3 Weitere Publikationen

- [15] Beer, M.; Steck, M.; Gobmaier, T. et al: Energiezukunft 2050. München, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2009
- [16] Goldmann, C.; Reid, M.; Levy, R.; Silverstein, A.: Coordination of Energy Efficiency and Demand Response – A RESOURCE OF THE NATIONAL ACTION PLAN FOR ENERGY EFFICIENCY in: Berkeley lab. Berkeley: Berkeley Lab, 2012

7.4 Im Rahmen des Projektes entstandene Patente

Es entstanden keine Patente im Rahmen des KW21 Projektes.

8 Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses

8.1 Studentische Mitarbeiter

In den Jahren 2009 bis 2012 wurden acht Studenten verschiedener Studienrichtungen (z.B. Elektrotechnik, Physik, Mathematik) beschäftigt:

Altschäffl, Sascha	Zusammenstellung von mathematischen Methoden zur Lastgang- analyse. Programmierung eines Softwaretools zur automatisierten Analyse von Lastgängen in VBA (Visual Basic for Applications). Sichtung, Analyse und Kategorisierung von Stromlastgängen industrieller Verbraucher.
Fang, Chen	Erstellung eines Modells zur Simulation und Zusammenfassung von elektrischen Lastgängen zum Gesamtlastgang Deutschland in Matlab. Entwicklung eines Algorithmus zur Erkennung und Verlagerung von Lastspitzen.
John, Christopher	Generierung eines Standard-Verbraucherlastgangs zu den TRY Wetterdaten des DWD mit einem multivarianten Regressions- modell. Analyse von Klimamodellen und Erstellung von typischen Jahreslastgängen für Lufttemperatur und Wind bis 2050 aus dem REMO Klimamodell des MPI-M für die TRY-Regionen.
Kranich, Sabine	Recherche zum Thema Gleichzeitigkeitsfaktor bei elektrischen Verbrauchern. Entwicklung einer Methodik zur Beeinflussung der Gleichzeitigkeit bei gemessenen Lastgängen. Aufbau von Modellen für Haushalte und Büros zur Generierung von Strom- lastgängen auf Basis statistischer und stochastischer Daten.

Schröpel, Verena	Aufbau von Testreferenzjahren für 15 Standorte Deutschlands auf Basis des globalen Klimamodells REMO für die Jahre 2010 bis 2050. Analyse des Zusammenhangs zwischen Kohlendioxid- emissionen und Verbraucherlast.
Weiker, Sebastian	Prüfung verschiedener Methoden zur synthetischen Abbildung von Lastgängen mittels eines minimierten Parametersatzes.
Zhukov, Ilya	Aufbau einer objektorientierten Datenstruktur in XML für ein Energiemodell. Programmierung von Funktionen zur Auswertung der Datenstruktur in Matlab.
Zöller, Tomas	Analyse und Kategorisierung von Industrielastgängen.

8.2 Studien-, Semester- und Bachelorarbeiten

Die beschäftigten Studenten wurden hauptsächlich im Rahmen von Pflichtpraktika und teilweise anschließenden Verlängerungen als wissenschaftliche Hilfskräfte beschäftigt. Dabei wurden keine Studien-, Semester- und Bachelorarbeiten angefertigt. Es wurden auch keine Diplom- und Masterarbeiten vergeben. Dies hatte den Vorteil, dass die studentischen Hilfskräfte flexibel an verschiedenen Themengebieten eingesetzt werden konnten.

Zwei Studenten wurden über das Projekt hinaus weiter beschäftigt. Von diesen hat einer seine Bachelorarbeit an der FfE geschrieben.

8.3 Promotionen

Im Rahmen dieses Projektes wird eine Promotion durchgeführt:

T. Gobmaier Aufbau einer Methodik zur Bestimmung der Auswirkungen von neuen Einflussfaktoren auf einen Bedarfslastgang

9 Forschungsprogramme des Bundes und der EU

9.1 Angaben, ob weitere Drittmittel zum Projektthema eingeworben wurden, insbesondere aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen des Bundes und der EU

An der Forschungsstelle für Energiewirtschaft werden die zwei KW21-Projekte "Einsatzmöglichkeiten von Elektrostraßenfahrzeugen zum Lastmanagement (BY 2E)" und "Simulationsgestützte Prognose des elektrischen Lastverhaltens (BY 3E)" bearbeitet. Weitere kraftwerksrelevante Forschungsvorhaben sind:

Chancen und Risiken von KWK im politischen Umfeld (EnEff:Stadt)

Modellregion Elektromobilität München (Konjunkturpaket II)

Flottenversuch eFlott (Konjunkturpaket II)



Kosten der Windenergie: Die Entwicklung des Marktes für windbedingte Kraftwerksreserve (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz)

Energiezukunft Bayern 2050 (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz)

9.2 Geplante Antragsstellung bzw. künftige Förderung aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen von Bund, EU etc. sowie allgemeinen Förderprogrammen (z.B. DFG)

Merit Order der Energiespeicherung im Jahr 2030 (Förderinitiative Energiespeicher des BMWi)

CarBox und Smart Box sowie zwei weitere Projekte im Rahmen der Modellkommune Elektromobilität Garmisch-Partenkirchen (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz)

Arbeitskreis Energiewirtschaft

Projekt: BW L 21E

Modell zur Portfolioauswahl in der Elektrizitätswirtschaft – Entwicklung eines Modells zur Bestimmung optimaler Erzeugungsportfolios zur Gewährleistung der langfristigen Versorgungssicherheit

Projektleiter:	Prof. DrIng. Alfred Voß Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung Universität Stuttgart
Mitarbeiter:	DiplIng. Johann Gottschling DiplWiIng. Ninghong Sun
Finanzierung:	Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg

1 Ausgangssituation

Neben den Chancen, von denen Marktteilnehmer durch die Liberalisierung der Elektrizitätsmärkte in Europa profitieren können, stellt die fortschreitende wettbewerbliche Ausrichtung die Elektrizitätswirtschaft auch vor neue Herausforderungen. Neben dem Risiko durch fluktuierende Einspeisung dargebotsabhängiger Energien existieren vor allem Preisrisiken auf Seiten der Energieträger und CO_2 -Zertifikate. Kraftwerksinvestitionen im Energieversorgungssystem sind kapitalintensiv, langfristig ausgerichtet und in der Regel irreversibel. Vor diesem Hintergrund ist die Ausgestaltung der Energieversorgung mit der Herausforderung konfrontiert, diese Risiken explizit bei den Investitionsentscheidungen über den Bau neuer Kraftwerke zu berücksichtigen. Ein effizient risikodiversifizierter Erzeugungs- und Energieträgermix erhöht die langfristige Versorgungssicherheit und sollte Ziel der Energiepolitik sowie der Investitions- und Ausbauentscheidungen sein.

1.1 Konventionelle modellgestützte Methoden der Investitionsplanung

Das Optimierungsproblem innerhalb traditioneller Herangehensweisen zur Beurteilung der Vorteilhaftigkeit einer Investition besteht allgemein darin, eine Zielfunktion, die i.d.R. die Gesamtkosten darstellt, mit bestimmten Nebenbedingungen zu minimieren. Dieser Minimalkostenansatz kann verwendet werden bei relativer Kostensicherheit, niedrigen



Modell zur Portfolioauswahl in der Elektrizitätswirtschaft

Technologiefortschrittsraten und rein deterministischen Annahmen über die zukünftige Preisentwicklung [2][3]. Risiken, die mit einer rein kostenbasierten Investitionsentscheidung verbunden sind, werden hierbei jedoch ignoriert.

Entscheidungsträger in der Elektrizitätswirtschaft sind heute mit einem zunehmend dynamischen und unsicheren Umfeld konfrontiert. Ungünstige Auswirkungen unsicherheitsbehafteter Einflussgrößen können nicht mehr auf den Elektrizitätspreis überwälzt werden. Angesichts dieser Konditionen ist es fraglich, allein auf Basis des Minimalkostenansatzes mittel- bis langfristig gültige optimale Investitionsalternativen zu identifizieren [6]. Methoden der Investitionsrechnung, die die Aussage der klassischen Kapitalwertmethode oder des Life Cycle Costing ergänzen, gewinnen daher zunehmend an Bedeutung. Neben dem Realoptionsansatz ist die Portfolioauswahl eine geeignete Bewertungsmethode für Investitionsentscheidungen unter Unsicherheit. Sie bietet die Möglichkeit zur Identifizierung effizienter Portfolios, bei dem die ausgewählten Kraftwerksprojekte zu einer insgesamt minimalen risikogewichteten Kostenerwartung führen. Das Gesamtrisiko kann dabei durch Diversifizierung verringert werden. Im Rahmen dieses Vorhabens wird die aus dem Bereich der Finanzwissenschaft stammende Methode der Portfolioauswahl auf die Investitionsentscheidungen in der Elektrizitätswirtschaft angewendet. Das Konzept wird nachfolgend dargestellt.

1.2 Die Methode der Portfolioauswahl als innovativer Ansatz der Ausbauplanung von Elektrizitätserzeugungsanlagen

MARKOWITZ hat zu Beginn der 1950er Jahre mit einem neuen methodischen Ansatz darauf hingewiesen, dass neben der Maximierung der Rendite die gleichzeitige Minimierung des zu erwartenden Risikos (z.B. repräsentiert durch die Varianz der Rendite) ein Ziel der Investitionsplanung sein sollte. In der Zwischenzeit ist der Gedanke der Risikodiversifizierung zu einem zentralen Element der Planung von Finanzinvestitionen geworden. Hierauf basierende Bewertungsmethoden wurden kontinuierlich erweitert. Die Portfoliotheorie wurde danach schrittweise auch auf die Risikodiversifizierung bei der Investitionsplanung für reale Vermögensgegenstände ausgeweitet [15].

Der Ansatz der Mean-Variance-Portfolio (MVP)-Selection wird schematisch mithilfe von Abbildung 1 erläutert. Analog zu einer Darstellung im Rendite-Risikoraum kann die Risikodiversifizierung auch kostenbasiert erfolgen. An die Stelle riskanter Wertpapiere treten in diesem Fall Technologieportfolios. Auf der Ordinate ist der Erwartungswert der Gesamtkosten der Elektrizitätserzeugung abgetragen, die Abszisse stellt das Risiko, z.B. in Form deren Standardabweichung dar, vgl. [14][22]. Neben der Standardabweichung sind weitere Risikomaße im Rahmen der Portfolioauswahl möglich, die in Kapitel 3 vorgestellt werden. Wie am Beispiel der Portfolios mit zufälliger Gewichtung einzelner Technologien in Abbildung 1 zu erkennen ist, unterscheiden sich diese hinsichtlich des Erwartungswerts ihrer Kosten und dem Risiko in Form der Streuung der Kosten um den Erwartungswert. Aus der Gesamtmenge der möglichen Technologieportfolios sind die effizienten dadurch gekennzeichnet, dass zu einem vorgegebenen Erwartungswert der Kosten kein anderes Portfolio existiert, das ein geringeres Risiko aufweist, bzw. zu einem bestimmten Risiko keine niedrigeren Kosten möglich sind. Demnach wären die Technologieportfolios (X) und (Y) nicht effizient, da bei beiden niedrigere Kosten möglich sind, ohne ein zusätzliches Risiko eingehen zu müssen.



Erwartungswert der Kosten, µ



Abbildung 1: Effizienzlinie und Nutzenfunktion im Kosten-Risiko-Raum

Die Effizienzlinie ist die Verbindungslinie der effizienten Portfolios und bildet die untere Beschränkung des Kosten-Risiko-Raums. Sie kann in einem Optimierungsprozess hergeleitet werden, ist unabhängig von den persönlichen Präferenzen des Entscheidungsträgers und kann objektiv für alle Entscheider verwendet werden. Die individuelle Risikoneigung kann in einem nachgelagerten Schritt berücksichtigt werden. Dazu muss die Nutzenfunktion des Entscheidungsträgers bekannt sein. Je nach seiner Risikoneigung wird entweder ein weniger riskantes Portfolio gewählt, allerdings zu Ungunsten der erwarteten Kosten, oder ein kostengünstigeres Portfolio, für das im Gegenzug jedoch ein höheres Gesamtrisiko in Kauf genommen werden muss. Das individuell optimale Portfolio (E) ist der Tangentialpunkt der Effizienzlinie und der Nutzenfunktion des Entscheidungsträgers (blaue Kurve in Abbildung 1). Demnach würde ein extrem risikoaverser Entscheidungsträger das Minimum-Risk (MR)-Portfolio wählen. Die Kosten, die sein gewähltes Portfolio generieren würde, wären von untergeordnetem Interesse. Auf der Gegenseite sähe ein risikoneutraler Anleger in dem Minimum-Cost (MC)-Portfolio die für ihn optimale Wahl.

1.3 Portfolioauswahl in der Elektrizitätswirtschaft

Bereits einige Jahre nach der ersten Ölkrise stellten BAR-LEV UND KATZ eine Arbeit vor, in der sie die Portfoliotheorie zur Beurteilung der Brennstoffbeschaffung einzelner Energieversorgungsunternehmen in unterschiedlichen Regionen Amerikas untersuchten [7]. Mit der wettbewerblichen Öffnung der Energiemärkte hat die Bedeutung der Portfolioauswahl für die Energiewirtschaft zugenommen.

JANSEN UND BEURSKENS analysierten unter Anwendung des Portfoliomodells von Markowitz das zukünftige Elektrizitätserzeugungsportfolio für die Niederlande. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass, ausgehend von einem ineffizienten Ausgangszustand, eine deutliche Risikoreduktion möglich ist, ohne die Elektrizitätserzeugung zu verteuern. Durch den Einsatz erneuerbarer Energien kann das Kostenrisiko erheblich reduziert werden [22]. Awer-BUCH untersuchte in ähnlichen Arbeiten die Energieversorgung verschiedener europäischer Länder [4][5]. KLEINDORFER UND LI untersuchten die Möglichkeiten einer Risikodiversifizierung von Energieversorgern mit Hilfe unterschiedlicher Handelsinstrumente (langfristige Lieferverträge, Terminkontrakte, Kauf- und Verkaufsoptionen) in der kurzen Frist mit einem





Value-at-Risk Ansatz [24]. DOHERTY ET AL. evaluierten in einer Studie für Irland, wie geeignete Erzeugungsportfolios aufgebaut sein müssen, um den zukünftigen Herausforderungen durch volatile Energieträgerpreise und CO_2 -Minderungsmaßnahmen gerecht zu werden [14].

Obgleich richtungweisend, wurden innerhalb dieser Untersuchungen die technischen Charakteristika von Elektrizitätserzeugungssystemen nicht angemessen berücksichtigt. Eine erste Arbeit, bei der die vereinfachte Integration ökonomischer und technischer Nebenbedingungen des Kraftwerkseinsatzes in ein Modell der Portfoliotheorie für den taiwanesischen Elektrizitätsmarkt vorgenommen wird, findet sich bei HUANG UND WU [19]. Entsprechende Arbeiten, die die Portfoliotheorie auf das deutsche Elektrizitätsversorgungssystem anwenden und einen optimalen Ausbau des Kraftwerksparks im Sinne einer Risikodiversifizierung zur Gewährleistung der langfristigen Versorgungssicherheit bei unsicheren Rahmenbedingungen untersuchen, sind nicht bekannt.

2 Projektziele

Das Projektziel ist die Entwicklung und Anwendung eines Modells der Portfoliotheorie zur Ermittlung optimaler Kraftwerksinvestitionsentscheidungen unter Berücksichtigung von Risiken und Unsicherheiten. Bei volatilen Brennstoffpreisen, fluktuierender Erzeugung auf der Basis erneuerbarer Energieträger und unsicheren energiepolitischen Rahmenbedingungen können durch portfoliobasierte Investitionsentscheidungen diversifizierte Portfolios ermittelt werden, die in Bezug auf die erwarteten Kosten und hinsichtlich des Risikos (z.B. Verfehlung der erwarteten Kosten) effizient sind. Abhängig von der Wahl einer individuellen Risikopräferenz kann aus der Menge effizienter Portfolios das optimale Portfolio bestimmt werden. Das klassische Modell der Portfoliotheorie, das ursprünglich für finanzwissenschaftliche Zwecke entwickelt wurde, muss dabei auf die Anforderungen der Elektrizitätswirtschaft angepasst und erweitert werden. Mit dem zu entwickelnden Modell sollen einerseits Kraftwerksausbaustrategien im nationalen Elektrizitätserzeugungssystem mit Blick auf einen langfristig tragfähigen Energieträgermix bei allgemeinen Preisrisiken, z.B. Brennstoffpreisen und andererseits Investitionsentscheidungen von Unternehmen in einem unsicheren Marktumfeld unterstützt werden. Unsicherheiten wie z.B. der zukünftige Anteil erneuerbarer Energien im System, der förderpolitisch beeinflusst und nicht probabilistisch beschrieben werden kann, werden durch Szenarioanalysen erfasst. Das Modell wird beispielhaft für die Bestimmung eines effizient risikodiversifizierten Ausbaus des Elektrizitätsversorgungssystems in Deutschland angewendet.

3 Vernetzung

3.1 Vernetzung innerhalb KW21

Neben einem Informationsaustausch im Rahmen der regelmäßig statt gefundenen Projektreffen wurden Rahmendaten zwischen den Projektmitarbeitern innerhalb des Arbeitskreises Energiewirtschaft ausgetauscht und abgestimmt.



3.2 Vernetzung außerhalb KW21

Eine Vernetzung außerhalb von KW21 existiert nicht.

4 Vorgehensweise und Methodik

Die Annahmen zur Preisentwicklung der zur Stromerzeugung eingesetzten Energieträger und CO.-Zertifikate sind ein bestimmender Faktor für zukünftige Investitionsentscheidungen. Für die Quantifizierung des Brennstoffpreis- und CO2-Preisrisikos wurden unterschiedliche Modellansätze entwickelt und Preisprojektionen erstellt. Die simulierten Preise werden als Eingangsgröße für die Portfoliomodelle benötigt. Basierend auf einer Sichtung und Analyse der Portfolioansätze in der Literatur wurden zwei Ansätze zur Portfolioauswahl in der Elektrizitätswirtschaft entwickelt. Der erste Ansatz minimiert die risikogewichteten Systemkosten eines Elektrizitätserzeugungssystems. Dabei wurde die Zielfunktion eines bestehenden risikoneutralen Elektrizitätsmarktmodells, das eine Untersuchung des Kraftwerksausbaus im Gesamtsystem ermöglicht, zu einem Portfoliomodell erweitert, um den Einfluss des Preisrisikos durch unsichere Brennstoff- und CO₂-Preise zu erfassen. Der zweite Ansatz ist ein neu entwickeltes lineares Optimierungsmodell, mit dem effiziente Kraftwerksportfolios mit dem zugehörigen Kosten-Risiko-Profil bestimmt werden können. Die Projektion der Brennstoff- und CO,-Preise und der Betrachtungszeitraum der Portfoliomodelle umfassen die Jahre 2013 bis 2030.

5 Projektergebnisse und Ausblick

5.1 Modellierung der CO₂-Preisrisiken

Abbildung 2 zeigt die historischen Spotpreise für Emissionsrechte (EUA) an der European Energy Exchange (EEX) vom 9. Marz 2005 bis zum 31. Mai 2012. Der Abwärtstrend in der Preisentwicklung der zweiten Handelsperiode, der seit Mitte 2011 beobachtet werden kann, hat sich seither fortgesetzt. Wie aus der Abbildung hervorgeht unterliegen die historischen Preise zum Teil erheblichen Schwankungen. Die hohe Volatilität durch einen mitunter sprunghaften Preisverfall in der ersten Handelsperiode ist dabei vor allem einer deutlichen Überschätzung der erfassten Emissionsmengen geschuldet. Nach der Veröffentlichung von verifizierten Emissionsdaten im April 2006 fiel der CO₂-Preis von 30 €/EUA um etwa 50 Prozent. Der Preisrückgang zum Ende der Handelsperiode geht darauf zurück, dass überschüssige Zertifikate nicht in die zweite Handelsperiode übertragen werden konnten und somit wertlos wurden. Die Preisentwicklung in der zweiten Handelsperiode ab dem Jahr 2008 ist vor allem durch die konjunkturelle Entwicklung geprägt. Infolge der Finanz- und Wirtschaftskrise und der Schuldenkrise sank die industrielle Produktion in Europa. Das dadurch ausgelöste Überangebot an CO₂-Zertifikaten führte zu den beobachteten Preisrückgängen in den Jahren 2008 und 2009 bzw. seit Beginn des Jahres 2011. In dem Zeitraum dazwischen kann allerdings auch eine relativ preisstabile Phase beobachtet werden, in der sich der Spotpreis um ein Niveau von 15 €/EUA bewegt.





Abbildung 2: Handelstägliche Preise von Emissionsrechten (EUAs) an der EEX vom 09.03.2005 bis 31.05.2012

In dieser Arbeit wurde die CO_2 -Preisentwicklung direkt aus historischen Daten geschätzt. In Betracht kommen z.B. diskrete (z.B. Generalized Auto-Regressive Conditional Heteroscedasticity GARCH) und zeitkontinuierliche stochastische Prozesse (z.B. Geometrische Brownsche Bewegung). Vorausgehende Arbeiten mit der Zielsetzung, das Preisverhalten von Emissionszertifikaten innerhalb der ersten Handelsperiode durch stochastische Prozesse zu beschreiben, schlussfolgern, dass sich dafür aufgrund der Dynamik und Heteroskedastizität der CO_2 -Renditen (Differenz der log- CO_2 -Preise) Regime-Switching (RS) [9][32], GARCH- [26] und Jump-Diffusion (JD) Prozesse [12][32] anbieten.

Um geeignete Prozesse zur Beschreibung der Preisdynamik der zweiten Handelsperiode zu identifizieren, werden nachfolgend EUA-Preise aus dem Zeitraum 25.03.2008 bis 31.05.2012 analysiert. Neben den oben genannten Prozessen, die sich zur Beschreibung der Preisdynamik in der ersten Handelsperiode als zweckmäßig erwiesen haben, wird zusätzlich noch eine Geometrische Brownsche Bewegung (GBB) und ein Ornstein-Uhlenbeck-(OU) Prozess mitbetrachtet. Letztere sind weit verbreitet in der Finanzmathematik und finden gleichermaßen Anwendung bei der Modellierung der Preisentwicklung auf Energiemärkten [13][20][23][30]. Die untersuchten Prozesse werden nachfolgend kurz beschrieben.

5.1.1 Ornstein-Uhlenbeck (OU) Prozess

Der OU-Prozess [33], auch bekannt als Mean Reversion Modell, kann zur Modellierung von Güterpreisen eingesetzt werden, die zwar im Zeitverlauf Preisschocks unterliegen, deren Wirkung aber vorübergehend ist. Das bedeutet, dass der Preis nach einem Schock stets zu seinem langfristigen Mittelwert zurückkehrt (z.B. Großhandelspreise für Strom). Der OU-Prozess ist wie folgt für logarithmierte Preise definiert:

$$ds_t = \alpha(\mu - s_t)dt + \sigma dW_t.$$

Die Definition der nachfolgenden Preismodelle wird ebenfalls für log-Preise angegeben. Die Komponente $\alpha(\mu$ - s_t) beschreibt den Trend hin zum gleichgewichtigen Mittelwert μ . Bewegt sich der aktuelle Preis durch den Einfluss des Störterms σdW_r weg von diesem



Modell zur Portfolioauswahl in der Elektrizitätswirtschaft

Mittelwert, steuert der Geschwindigkeitsparameter α , wie schnell die Rückkehr zu μ erfolgt. Je größer der Geschwindigkeitsparameter, desto kleiner ist der Preiskorridor um den gleichgewichtigen Mittelwert. Damit Mean-Reversion vorliegt, müssten die EUA-Preise schwach stationär sein [32]. Das bedeutet, dass der Mittelwert und die Varianz des datengenerierenden stochastischen Prozesses konstant sind und dass die Kovarianz nur von der zeitlichen Entfernung der Zufallsvariablen abhängt. Für die Überprüfung der Stationaritätseigenschaft der EUA-Preise wurde ein Einheitswurzeltest in Form des Augmented Dickey Fuller (ADF) Tests durchgeführt. Dieser Test stellt die Hypothesen Nichtstationarität (Nullhypothese) und Stationarität (Alternative) der Zeitreihe gegenüber. Zur Testdurchführung wird die Zeitreihe auf den zeitverzögerten Wert der gleichen Zeitreihe regressiert. Um eine potenzielle Autokorrelation der Residuen zu beseitigen, werden zusätzlich noch zeitverzögerte Differenzen der Zeitreihe als Regressoren mit aufgenommen. Wie viele dieser Verzögerungsglieder mit aufzunehmen sind, wird über Informationskriterien festgelegt. Die erforderliche Anzahl ist die, bei der das Informationskriterium minimal wird. Hierbei wurden das Bayessche- (BIC) und das Hannan-Quinn-Informationskriterium (HQIC) verwendet. Beide Kriterien sind minimal, wenn keine weiteren Verzögerungsglieder in die Regressionsgleichung integriert werden. Im ADF-Testergebnis kann die Einheitswurzel mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0.01 und 0.05 nicht signifikant abgelehnt werden. Die getestete Zeitreihe erfüllt damit nicht die Stationaritätseigenschaften. Die Mean-Reversion Annahme für die EUA-Preise ist somit auf einem Signifikanzniveau von 0.01 aus ökonometrischer Sicht nicht gerechtfertigt.

5.1.2 Geometrische Brownsche Bewegung (GBB)

Der Prozess setzt sich aus einer deterministischen und einer stochastischen Komponente zusammen und ist wie folgt definiert:

$$ds_t = \left(\mu - \frac{1}{2}\sigma^2\right)dt + \sigma dW_t, \, dW_t \sim N(0, \sqrt{dt}).$$

 $\left(\mu - \frac{1}{2}\sigma^2\right)$ ist der deterministische Driftterm und beschreibt den erwarteten Zuwachs von st in einer Zeiteinheit. Durch den Einfluss der stochastischen Komponente σdW_{ι} streuen die Zuwächse um den Driftterm. dW_{ι} ist das Inkrement eines Wiener-Prozesses. Über die Volatilität σ wird der Einfluss der stochastischen Komponente gewichtet. Die GBB setzt normalverteilte Inkremente (Renditen) voraus. Die Wölbung der empirischen Dichtefunktion der Renditen ist jedoch mit einem Wert von 6,7 deutlich steilgipfliger als die einer Normalverteilung. Im Vergleich treten also extreme Renditen statistisch häufiger auf. Eine Normalverteilung würde die EUA-Renditen nicht hinreichend genau beschreiben.

5.1.3 Jump-Diffusion (JD) Prozess

Die häufiger beobachteten extremen Renditen können berücksichtigt werden, indem der GBB eine Komponente für Preissprünge hinzugefügt wird. Dadurch erhält man einen Jump-Diffusion (JD) Prozess, auch bekannt als Merton-Modell [25]. Dieser Prozess ist wie folgt definiert:

$$ds_t = \left(\mu - \frac{1}{2}\sigma^2\right)dt + \sigma dW_t + \xi_t dJ_t, \qquad \xi_t \sim N(\mu_{\xi}, \sigma_{\xi})$$


Zusätzlich zu der Gleichung für eine GBB addiert sich ein davon unabhängiger Poisson-Prozess J_t mit einer zu schätzenden Intensität (Sprunghäufigkeit). dJ_t beschreibt die Anzahl der Ereignisse (Sprünge), die in einem bestimmten Zeitinterval auftreten. Für die Sprunghöhe ξ_t kann eine Normalverteilung unterstellt werden mit Erwartungswert μ_{ξ} und Standardabweichung σ_t .

5.1.4 GARCH-Prozess

Eine Betrachtung der Log-Renditen in Abbildung 3 der CO_2 -Preise zeigt, dass die Volatilität der EUA-Preise im Zeitverlauf schwankt. Durch ein GARCH (p, q)-Modell kann diese Eigenschaft berücksichtigt werden.

$$r_t = s_t - s_{t-1}; \ r_t = \sigma_t \varepsilon_t; \ \sigma_t^2 = c + \sum_{p=1}^P \alpha_p r_{t-p}^2 + \sum_{q=1}^Q \beta_q \sigma_{t-q}^2$$

Die Varianz wird dabei nicht als konstant angenommen, sondern hängt von ihren eigenen früheren Werten und von früheren Werten der Zeitreihe ab. Die Indizes p und q bezeichnen die Ordnung des Prozesses, bzw. wie viele autoregressive Terme jeweils in die Gleichung für die bedingte Varianz mit aufgenommen werden [10].



Abbildung 3: Handelstägliche Log-Renditen der EUA aus dem Zeitraum 25.03.2008 bis 31.05.2012

Um formal die Eigenschaft der bedingten Heteroskedastizität zu prüfen, wird zunächst die Autokorrelation und partielle Autokorrelation der quadrierten Renditen ausgewertet. Entsprechend Abbildung 4 besteht eine signifikante Autokorrelation.





Abbildung 4: Autokorrelation und partielle Autokorrelation der quadrierten Residuen

Zudem wird ein Engle's-ARCH-Hypothesentest durchgeführt, der die Nullhypothese (keine bedingte Heteroskedastizität) gegen die Alternativhypothese (ARCH-Modell mit p Verzögerungsgliedern) prüft. Ein ARCH-Modell entspricht einem GARCH(p, 0)-Modell, d.h. die bedingte Varianz ist unabhängig von ihrer Vergangenheit. Im Ergebnis wird die Nullhypothese für p=2 mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0.01 abgelehnt. Das Testergebnis spricht dafür, dass ein symmetrisches GARCH (1,1)-Modell geeignet sein könnte.

5.1.5 Regime-Switching (RS) Prozess

Ein weiterer zeitdiskreter stochastischer Prozess, der für die Modellierung des CO₂-Preisrisikos in Frage kommt, ist der Regime-Switching (RS) Prozess. Das Preisverhalten der EUA-Preise wird hierbei in mehrere getrennte Phasen (Regimes) geteilt. Phasen mit einer veränderten Volatilität könnten so mit einem Regimewechsel begründet werden. Den einzelnen Regimes können dabei unterschiedliche stochastische Prozesse zugeordnet werden [11].

$$r_t = s_t - s_{t-1} = \mu_{R_t} + \varepsilon_t, \quad \varepsilon_t \sim N(0, \sigma_{R_t}^2)$$

Für die vorliegende Arbeit wurde ein stochastischer Prozess mit zwei unterschiedlichen Regimes unterstellt, $R_r = \{1,2\}$. Die Drift μ und die Varianz des Störterms σ_{Rt}^2 sind dabei abhängig vom aktuellen Regime. Der Regimewechsel wird von einer Zufallsvariable bestimmt, die einer Markov-Kette mit zwei Zuständen folgt. Ein diskreter stochastischer Prozess erfüllt die Markov-Eigenschaft, wenn die Wahrscheinlichkeit für den aktuellen Zustand nur vom direkt vorausgehenden und nicht von früheren Zuständen abhängt. Die Übergangsmatrix p_{ii} enthält die Wahrscheinlichkeiten für die Regimewechsel.

$$p_{ij} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{21} \\ p_{12} & p_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{11} & 1 - p_{11} \\ 1 - p_{22} & p_{22} \end{pmatrix}$$

5.1.6 Schätzung der Modellparameter und Simulation der EUA-Preise

Die Schätzung der Modellparameter erfolgt durch die Maximierung der log-Likelihood Funktionen der beschriebenen Modelle. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst.



Modell zur Portfolioauswahl i	n der Elektrizitätswirtschaft
-------------------------------	-------------------------------

Prozess	Ergebnis	se der M	aximum Lo	g-Likeliho	od Schät	zung
OU	α	μ	σ			
ML-Schätzer	0,0018	1,96	0,0284			
Standardfehler	0,0035	901,7	0,0006			
t-Statistik	0,5	0,0	45,8**			
GBB	μ	σ				
ML-Schätzer	-0,0012	0,0284				
Standardfehler	0,0019	0,0005				
t-Statistik	-0,6	59,9**				
JD	μ	σ	λ	μξ	σξ	
ML-Schätzer	-0,0012	0,0155	0,4628	-0,0026	0,0347	
Standardfehler	0,0009	0,0007	0,0193	0,0022	0,0017	
t-Statistik	-1,4	20,7**	24**	-1,2	20**	
GARCH	α	β	С			
ML-Schätzer	0,1001	0,8932	9,40E-06			
Standardfehler	0,0117	0,0128	2,48E-06			
t-Statistik	8,6**	69,8**	3,8**			
RS	μ1	σ1	μ2	σ2	p ₁₁	p ₂₂
ML-Schätzer	0,0009	0,0002	-0,0040	0,0015	0,9755	0,9687
Standardfehler	0,0007	0,00001	0,0019	0,0001	0,04	0,04
t-Statistik	1,3	23,9**	-2,1*	15,5**	24,4**	24,4**

Tabelle 1: Ergebnisse der Maximum-Likelihood Schätzung

Für die Beurteilung der Signifikanz der geschätzten Modellparameter wird die t-Teststatistik mit angegeben. Diese zeigt an, welche der Parameter einen Erklärungsgehalt für die abhängige Modellvariable liefern. Die aufgrund sinkender Emissionsziele zu erwartenden Preissteigerungen bei den Emissionsrechten spiegeln sich nicht in den Simulationsergebnissen wieder. Die Preisprojektionen mit dem GBB- und JD-Modell sind aufgrund der negativen Drift fallend. Bei der Simulation mit dem RS-Modell stagnieren die CO_2 -Preise in ihrem Erwartungswert auf dem Ausgangsniveau von ~6 \in /t. Bei dem OU Modell streben die Preise ihr langfristiges Mittel von ~7 \in /t an. Bei dem GARCH-Modell steigen die CO_2 -Preise zwar in ihrem Erwartungswert deutlich auf ~60 \in /t im Jahr 2030. Der Preisanstieg ist jedoch wenigen Szenarien mit extremen Preisverläufen geschuldet. In der Mehrheit der simulierten Szenarien tendieren die Preise analog zum GBB- und JD Modell gegen null.

Für die vorliegende Arbeit wird daher das OU Modell mit einem externen Preistrend gekoppelt. Als langfristiger Mittelwert, dem die Preise zustreben, wird jedoch nicht der geschätzte konstante Wert entsprechend Tabelle 1 eingesetzt, sondern der Preistrend aus dem WEO_{2012} new policies Szenario [21]. In Abbildung 5 sind der Erwartungswert und die Perzentile der Ordnung P₀₅ und P₉₅ mit diesem modifizierten Modell dargestellt. Der Preisverlauf des Erwartungswerts entspricht dabei dem Preistrend aus dem gewählten WEO-Szenario.





Abbildung 5: Simulierte Preisbänder für EUA in Monatsmitteln von 2013-2030

5.2 Modellierung der Energieträger-Preisrisiken

Die Entwicklung der historischen Energieträgerpreise von Erdöl, Erdgas und Steinkohlen entsprechend Abbildung 6 lässt vermuten, dass der Preisverlauf der betrachteten Energieträger nicht unabhängig voneinander ist. Seit Beginn der 1980er Jahre scheinen vor allem die Erdgaspreise den Erdölpreisen mit einer Verzögerung von bis zu einem halben Jahr zu folgen. Ein simultaner Verlauf bei den Erdöl- und Steinkohlepreisen kann dagegen vor allem in der Zeit vor 1987 und nach 2000 beobachtet werden. Die Gründe für die mitunter stark volatile Preisentwicklung sind vielfältig und können auf geopolitische Spannungen, wirtschaftliche Faktoren und Wetterextreme zurückgeführt werden. Im Hinblick auf die Energieträgerpreismodellierung finden sich in der Literatur unterschiedliche Ansätze. Fundamentalanalytische Modelle eignen sich nur bedingt für längerfristige Preisprognosen. Schwierigkeiten bereit dabei die Prognose der angebots- und nachfrageseitigen Einflussvariablen [27], z.B. die Entwicklung der Produktionskapazitäten oder das weitere Bevölkerungs- und Einkommenswachstum und damit verbunden die weitere Entwicklung der Energienachfrage. Daneben kann die Preisentwicklung über stochastische Prozesse und Zeitreihenmodelle beschrieben werden. Eine isolierte Betrachtung der einzelnen Energieträger kann aber die beobachteten Interdependenzen nicht erfassen. Für diese Arbeit wird daher ein multivariater Ansatz gewählt. Für die Projektion zukünftiger Preispfade werden zwei Modelle, eine multivariate Geometrische Brownsche Bewegung (MGBB) und ein Vektor-Autoregressives (VAR) Modell, geschätzt und simuliert.





Abbildung 6: Reale Einfuhrpreise für Erdöl, Erdgas und Steinkohlen von 1970 bis 2012

Im Gegensatz zu der eingangs beschriebenen univariaten GBB gehen im multivariaten Fall korrelierte Zufallszahlen, die mithilfe der Cholesky-Faktorisierung erzeugt wurden, als Störterm ins Modell ein. Charakteristisch am VAR-Modell in Bezug auf die Problemstellung ist, dass die Preisentwicklung eines Energieträgers nicht nur in Abhängigkeit der eigenen vergangenen Preise, sondern auch abhängig von der Entwicklung der mitbetrachteten Brennstoffpreise modelliert wird. Autoregressive Matrizen (A_i) erfassen dabei die gegenseitigen Abhängigkeiten und werden aus Vergangenheitspreisen der Energieträger geschätzt. Das Modell wird ergänzt um einen Konstantenvektor c und multivariates weißes Rauschen ε_{c} .

$$\begin{pmatrix} p_{oil} \\ p_{gas} \\ p_{coal} \end{pmatrix}_{t} = c + \sum_{i=1}^{n} A_{i} * \begin{pmatrix} p_{oil} \\ p_{gas} \\ p_{coal} \end{pmatrix}_{t-1} + \varepsilon_{t} ; A_{i} = \begin{bmatrix} oil \to oil & gas \to oil & coal \to oil \\ oil \to gas & gas \to gas & coal \to gas \\ oil \to coal & gas \to coal & coal \to coal \end{bmatrix}$$

Vor der Durchführung der Zeitreihenanalyse wird die notwendige Stationaritätsbedingung der Zeitreihe überprüft. Dazu werden die logarithmierten Energieträgerpreise einem ADF-Test unterzogen (vgl. Kap. 3.1.1). Das Stationaritätskriterium bei einem vektoriellen Prozess erfordert, dass die beteiligten univariaten Einzelprozesse stationär sind. Im Testergebnis erfüllt jedoch keine der Zeitreihen dieses Kriterium – die Einheitswurzelhypothese kann auf einem Signifikanzniveau von zehn Prozent nicht verworfen werden. Ursächlich für die mangelnde Stationarität sind Trends in den Zeitreihen. Der Einsatz trendbehafteter Zeitreihen in einer Regression birgt die Gefahr, auf signifikante Scheinzusammenhänge zu schließen. Auf diese Probleme wurde erstmals in [17] hingewiesen. Potenzielle Trends sind daher aus den Zeitreihen zu entfernen. Es werden dabei deterministische und stochastische Trends unterschieden. Stochastische Trends in einer Zeitreihe verstoßen gegen die Eigenschaft der Varianzstationarität. Deterministische Trends verstoßen zusätzlich gegen die Eigenschaft der Mittelwertstationarität. Eine Möglichkeit, eine Zeitreihe mit einem deterministischen Trend in einer Regression einzusetzen, besteht darin, diesen vorab zu isolieren. Dazu wird jeweils ein lineares Modell an die Zeitreihe angepasst [28]. Für die Regressionsgleichungen gilt entsprechend:

$$y_{it} = \beta_{i0} + \beta_{it} * t + \varepsilon_{it}$$



Bei keinem der betrachteten Energieträgerpreise wurde ein signifikanter linearer Trend gefunden. Daher führt gegebenenfalls ein stochastischer Trend zum Verlust der Stationarität. Durch Differenzenbildung kann eine Zeitreihe mit einem stochastischen Trend in eine schwach stationäre Zeitreihe überführt werden [28]. Eine weitere Möglichkeit, einen stochastischen Trend einer Zeitreihe zu entfernen, besteht in der Filterung der Ausgangsdaten. Durch Anwendung des Hodrick-Prescott (HP) Filters [18] kann der nicht-lineare Trend der Energieträgerpreise von der zyklischen Komponente (Konjunkturschwankungen) und irregulären Schwankungen getrennt werden. Die gefilterten Zeitreihen sind stationär.

Die Parameterschätzung wird nachfolgend mit HP-gefilterten Zeitreihen durchgeführt. Vor der Schätzung der Modellparameter muss die optimale Lag-Länge des VAR-Modells festgelegt bzw. die Anzahl der Verzögerungsglieder bestimmt werden, die als Prädiktoren mit aufgenommen werden sollen. Dafür können [11] zufolge Informationskriterien für multivariate Modelle verwendet werden, die jeweils dann ein Minimum annehmen, wenn die optimale Lag-Länge erreicht ist. Nachfolgend werden drei für multivariate Modelle modifizierte Informationskriterien betrachtet: das Akaike- (mAIC), das Bayessche- (mBIC) und das Hannan-Quinn-Informationskriterium (mHQIC).

Im Ergebnis wäre dem mAIC zufolge die optimale Lag-Anzahl 7, dem MHQIC zufolge 6 und nach Maßgabe des mBIC müssten fünf Verzögerungsglieder aufgenommen werden. An dieser Stelle sei hervorgehoben, dass der Strafterm des mBIC deutlich strenger als der des mAIC ist, was sich vor allem bei kleineren Stichprobengrößen bemerkbar macht. Der Strafterm des mHQIC liegt dazwischen. Würde eine zu geringe Lag-Länge gewählt, wären die geschätzten Koeffizienten der verbleibenden Regressoren verzerrt, da sie den Einfluss der vernachlässigten Variablen enthalten würden. Dagegen würden zu viele Regressoren zu ineffizienten Schätzungen aufgrund von irrelevanten Variablen führen [16]. Für die Schätzung der Modellparameter im vorliegenden Fall werden sechs Verzögerungsglieder gemäß dem mHQIC-Testergebnis aufgenommen. Um beurteilen zu können, welche Regressoren einen signifikanten Einfluss auf die Regressanden haben, wird eine Granger-Kausalitätsprüfung vorgenommen. Dabei wird sukzessiv jeweils der Einfluss eines der verzögerten Energieträgerpreise ausgeschaltet, indem die entsprechenden Regressionskoeffizienten in den Parametermatrizen auf null gesetzt werden (Nullhypothese). Anschließend wird ein F-Test durchgeführt, der die guadrierte Summe der Residuen des restringierten und unrestringierten Modells (Alternativhypothese) vergleicht [11]. Tabelle 2 zeigt die Testergebnisse. Hiernach ist es für alle betrachteten gefilterten Energieträgerpreise signifikant besser, neben den eigenen zeitverzögerten Preisen die zeitverzögerten Erdölpreise als erklärenden Variablen mit aufzunehmen. Zwischen Erdöl und Erdgas auf der einen Seite und Steinkohle und Erdgas sowie Steinkohle und Erdöl auf der anderen Seite besteht allerdings nur eine einseitige Kausalität.

oil	gas	coal	hat keinen Einfluss auf
482,17**	2,06	0,49	oil
15,63**	394,29**	1,84	gas
6,26**	0,74	552,59**	coal

** Nullhypothese kann auf dem 1-Prozent Level verworfen werden.

Tabelle 2: Ergebnisse des Hypothesentests (F-Statistik)



Ferner ergeben sich dem Test zufolge die Erdgaspreise unabhängig von Steinkohlepreisen. Das VAR-Modell wird entsprechend den Testergebnissen aus Tabelle 2 angepasst und simuliert.



Abbildung 7: Projektionen der Erdöl-, Erdgas und Steinkohlepreise mit dem MGBBund VAR-Modell (rechts)

Um konsistente Preisszenarien zu erhalten, wird nach der Simulation jedoch nicht der historische Trend addiert, der zuvor durch die HP-Filterung beseitigt wurde, sondern der Preistrend für den jeweiligen Energieträger aus dem WEO_{2012} new policies Szenario. Die Preisbänder und die Perzentile der Ordnung P₀₅ und P₉₅ der Projektionen mit dem VAR_{WEO}-Energieträgerpreismodell sind im rechten Teil von Abbildung 7 dargestellt. Die simulierten Preisbänder des rein aus Vergangenheitsdaten (es wurden keine externen WEO-Trends verwendet) parametrisierten MGBB-Energieträgerpreismodells sind gegenübergestellt. Neben den absolut höheren Erwartungswerten der MGBB-Erdöl- und -Erdgaspreise steigt im Vergleich zu den VAR_{WEO}-Preisen die Volatilität im Zeitverlauf.

Die Kosten für Braunkohle- und Kernbrennstoff werden für den Betrachtungszeitraum konstant angenommen und orientieren sich in ihrer Höhe mit 4 bzw. 3.7 $\in_{_{2010}}$ /MWh_{th} an den Ergebnissen in [34].

5.3 Methodik und vorliegende Ergebnisse der Portfolioanalyse

Wie einleitend angedeutet wurden zwei Modelle zur Portfolioauswahl entwickelt. Das erste Modell minimiert die risikogewichteten Systemkosten eines Elektrizitätserzeugungssystems. Dafür wurde die Zielfunktion eines am IER entwickelten risikoneutralen Elektrizitätsmarktmodells, das eine Untersuchung des Kraftwerksausbaus im Gesamtsystem ermöglicht, zu einem Portfoliomodell erweitert, um den Einfluss des Preisrisikos durch unsichere Energieträger- und CO₂-Preise zu erfassen. Eine detaillierte Beschreibung des Elektrizitätsmarktmodells findet sich in [31]. Die Preisbildung im Modell erfolgt grenzkostenbasiert mit einer zeitlichen Auflösung von 144 Typstunden. Um eine Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen aus dem zweiten Modellierungsansatz zu gewährleisten, wird auf bestimmte Eigenschaften des Modells verzichtet. Dasselbe Elektrizitätsmarktmodell wird dort vordergründig für die Bestimmung einer Verteilung der Stromgestehungskosten einzelner Technologien eingesetzt, wofür mehrere Modellläufe nötig sind. Für eine akzeptable Rechendauer mussten daher Vereinfachungen vorgenommen werden. So wird eine lineare Version des Modells verwendet und Deutschland wird isoliert betrachtet.



Interregionale Effekte durch Stromaustausch zwischen den angrenzenden europäischen Teilmärkten bleiben damit unberücksichtigt. Der Wärmemarkt wird nicht modelliert. Weiterhin wird zugunsten der Rechendauer auf kraftwerksspezifische intertemporale Restriktionen, wie z.B. Mindeststillstands-, Mindestbetriebs- und Anfahrzeiten, verzichtet. Die thermischen Kraftwerke und Speicher im Modell werden nicht blockschaff erfasst, sondern zu Kraftwerksklassen aggregiert. Die installierte Kapazität der bestehenden Kraftwerke wurde entsprechend den letzten veröffentlichten Kraftwerkslisten von Bundesnetzagentur und Umweltbundesamt aktualisiert. Der Anteil der erneuerbaren Energien im System wird modellexogen vorgegeben entsprechend den Szenarien 80 minus und 60 plus, die innerhalb des Arbeitskreises Energiewirtschaft abgestimmt wurden. Die Zahl im ieweiligen Szenarionamen steht für den Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromvebrauch im Jahr 2050. Minus (plus) steht für einen sinkenden (steigenden) Stromverbrauch im Zeitverlauf. Die CO₂-Preiseprojektionen entsprechen dem simulierten OU-Modell mit externem WEO-Trend. Die Energieträgerpreisprojektionen erfolgen zum Vergleich der Portfolio-Modellergebnisse sowohl mit dem VAR-Modell mit externem WEO-Trend als auch mit dem MGBB-Modell.

Vorausgehend zur Modellerweiterung wurden verschiedene Risikomaße geprüft, die in ein lineares Optimierungsproblem integrierbar sind. Dabei wurden sowohl Risikomaße berücksichtigt, die nur das Downside-Risiko erfassen, also das Risiko einer einseitigen (ungünstigeren) Abweichung vom Erwartungswert (Right Semi Absolute Deviation, RSAD) als auch Risikomaße, die ein positiveres Ergebnis als erwartet gleichermaßen riskant einstufen (Mean Absolute Deviation, MAD). Das Risikomaß RSAD erfasst einseitige Abweichungen riskanter Einflussgrößen (Energieträger- und CO₂-Preise) von ihrem Erwartungswert [35] und ist wie folgt definiert:

$$RSAD_{j,t} = \Sigma_{l} p_{l} * max (0, P_{j,t,l} - E[P_{j}])$$

Das Risiko, dass die Preise $P_{j,t,l}$ höher sind als deren Erwartungswert ($E[P_j]$) wird dabei für jeden Energieträger (*j*) und Zeitpunkt (*t*) ermittelt, indem die Abweichungen aus allen Szenarien (*l*) – gewichtet mit ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit p_l – aufsummiert werden. In Verbindung mit dem Brennstoffeinsatz $FU_{j,t}$ entstehen Zusatzkosten (*XC*), die in die Zielfunktion mit einfließen [8].

$$XC = \sum_{j,t} RSAD_{j,t} * FU$$
 $ZF = E[cost] + \lambda * XC$

Diese Zusatzkosten werden in die Zielfunktion ZF mit aufgenommen. Ihr Einfluss wird dabei über die Risikoaversion λ , die die Risikopräferenz des Entscheidungsträgers charakterisiert, gewichtet. Je höher dieser Faktor gesetzt wird, desto höher ist auch der Einfluss der Zusatzkosten in der Zielfunktion.





Abbildung 8: Optimales Investitionsportfolio (kumulierte Kraftwerksinvestitionen) bis 2030 mit RSAD-Portfoliomodell und VARWEO-Energieträgerpreisen

Mangels belastbarer Daten zur Höhe der absoluten Risikoaversion eines Landes im Hinblick auf die Ausrichtung seiner zukünftigen Elektrizitätsversorgung werden – analog zu vorausgehenden Untersuchungen anderer Autoren - im Rahmen von Sensitivitätsanalysen die risikogewichteten Systemkosten jeweils für unterschiedliche Werte der absoluten Risikoaversion optimiert. In dieser Arbeit wird die Risikoaversion mit Werten zwischen λ =0 (entspricht Risikoneutralität) und λ =100 beschrieben. In Abbildung 8 sind die Modellergebnisse des Investitionsportfolios aus dem RSAD-Portfoliomodell für die Szenarien 60 plus und 80 minus mit Energieträgerpreisen aus dem VAR-Modell für verschiedene λ dargestellt. Wie an den Ergebnissen zu erkennen ist, besteht das Zubauportfolio in beiden Szenarien für λ kleiner als 60 ausschließlich aus Braunkohlekraftwerken, die in unterschiedlichen Jahren im Betrachtungszeitraum verfügbar sind. LIGN steht für Braunkohlekraftwerke und GASCC für Gaskombikraftwerke. Die Zahl in der jeweiligen Kraftwerksklasse steht für das Jahr, ab dem das Kraftwerk verfügbar ist. Es wird angenommen, dass zukünftige Kraftwerke über höhere Wirkungsgrade verfügen und niedrigere spezifische Investitionskosten aufweisen. Bis zu einem λ von 60 sind die Zusatzkosten durch höhere Energieträger- und CO₂-Preise bei Gas- und Steinkohlekraftwerken größer als die rein CO_2 -Preis abhängigen Žusatzkosten von Braunkohlekraftwerken. Erst ab einem λ von 60 verschiebt sich dieses Verhältnis zugunsten von Gaskombikraftwerken. Werden die Energieträgerpreisprojektionen an Stelle des VAR_{MEO}- mithilfe des MGBB-Preismodells erzeugt, das zu einer deutlich stärkeren Streuung der simulierten Energieträgerpreise führt, finden bis zu einem λ von 100 keine Investitionen in Gaskraftwerke statt.

Der zweite Modellansatz innerhalb der Portfolioanalyse ist ein lineares Optimierungsmodell, mit dem effiziente Kraftwerksportfolios mit dem zugehörigen Kosten-Risiko-Profil bestimmt werden können. Im Gegensatz zum Großteil der bekannten Portfolioansätze in der Literatur können effiziente Portfolios nicht nur für einzelne Stützjahre, sondern auch über einen längeren Betrachtungszeitraum ermittelt werden. Als lineares Risikomaß wird der *Conditional Value at Risk*, kurz **aCVaR, zu einem bestimmten Konfidenzniveau a verwen**det (vgl. [29][35]). Dieses Risikomaß erfasst den "Portfolioverlust", der über den *Value at Risk* (aVaR) hinausgeht. Bezogen auf einen potenziellen Verlust bezeichnet der *Value at Risk* einen Schwellenwert (bestimmtes Quantil), der zu einem festgelegten Konfidenzniveau a nicht überschritten wird (vgl. Abbildung 9).





Abbildung 9: Verlustverteilung und Conditional Value at Risk (CVaR)

Nachfolgend wird dieser "Verlust" als positive Abweichung der mit Preisrisiken behafteten Stromgestehungskosten eines Kraftwerksportfolios von ihrem Erwartungswert aufgefasst. Dieser Ansatz bedarf als Modellinput einer Verteilung der Stromgestehungskosten in Abhängigkeit kombinierter Brennstoff- und CO,-Preisszenarien. Diese Kostenverteilung wird mithilfe szenarioabhängiger Modellrechnungen in dem oben beschriebenen Elektrizitätsmarktmodell bestimmt. Auf diese Weise wird ermittelt, welche Kraftwerke im Betrachtungszeitraum zugebaut und wie diese und bestehende kostenminimal eingesetzt werden. Im Anschluss wird dann in der Zielfunktion des CVaR-Portfoliomodells der Conditional Value at Risk des Kraftwerksportfolios zu jeweils vorgegebenen erwarteten Stromgestehungskosten, die das Kraftwerksportfolio im betrachteten Zeitraum nicht überschreiten darf, minimiert und die zugehörigen Portfoliokomponenten bestimmt. Die vorgegebenen Zielkosten richten sich dabei nach den minimal bis maximal möglichen Stromgestehungskosten des Portfolios im Betrachtungszeitraum. Ein Portfoliorisiko entsteht erst dann. wenn die Stromgestehungskosten der Technologieoptionen in diesem Zeitraum ihren Erwartungswert überschreiten. Dabei muss die jährliche Stromnachfrage nach Abzug der Erzeugung aus erneuerbaren Energien gedeckt werden. Das CVaR-Portfoliomodell entscheidet dann, welche der Bestandskraftwerke und Zubauoptionen dafür eingesetzt werden. Basierend auf dem aktuellen thermischen Erzeugungsportfolio für Deutschland und den fundamentalanalvtisch ermittelten Zubaukraftwerken wurde das Modell exemplarisch für den Zeitraum 2013-2030 angewendet. Das Konfidenzniveau wurde auf 95 Prozent gesetzt, d.h. das Risiko ist als Erwartungswert der 5 % höchsten Abweichungen vom Erwartungswert der Stromgestehungskosten zu interpretieren. Die Modellergebnisse mit dem CVaR-Portfoliomodell für das Szeanrio 80 minus sind in Abbildung 10 dargestellt. Im rechten Teil der Abbildung wurden die Projektionen der Energieträgerpreise mithilfe des MGBB-Preismodells (nachfolgend CVaR_{MGRB}), im linken Teil mithilfe des VAR_{WEO}-Preismodells (nachfolgend CVaR_{VAR}) erstellt.





Abbildung 10: Effiziente Kraftwerksportfolios bis 2030 mit CVaR-Portfoliomodell, Szenario 80 minus

In der Abbildung ist jeweils die Effizienzlinie für den gesamten thermischen Kraftwerkspark und die Struktur der Zubauportfolios als Tortendiagramm dargestellt. Auf der Abszisse sind die durchschnittlichen erwarteten Stromgestehungskosten des gesamten thermischen Erzeugungsparks im modellierten Zeitraum abgetragen. Auf der Ordinate steht das Risiko als zusätzliche Kosten, mit denen in den "schlimmsten" fünf Prozent im Erwartungswert zu rechnen ist. In der Legende sind die Zubautechnologien, die das Portfoliomodell einsetzt. LIGN15 und LIGN20 bezeichnen Braunkohlekraftwerke, die ab dem Jahr 2010 bzw. 2020 verfügbar sind. COAL20 und GASCC15 bzw. GASCC20 stehen für Steinkohlebzw. Gaskombikraftwerke, die ab dem Jahr 2015 bzw. 2020 verfügbar sind. Im Ergebnis ist das Zubauportfolio mit den niedrigsten Kosten unabhängig vom unterstellten Energieträgerpreismodell braunkohledominant. Dieses Portfolio hat zugleich aber auch das höchste Risiko aufgrund relativ stärker streuender CO₂-Preise im Zeitverlauf, verbunden mit einem hohen CO₂-Faktor der Braunkohlekraftwerke. Bei einem technologiereinen Zubau von Braunkohle liegen die durchschnittlichen erwarteten Stromgestehungskosten des gesamten Kraftwerksportfolios in Deutschland im Betrachtungszeitraum bei ~44 €/MWh_a (CVaR_{V4R}) bis ~47 €/MWh_{el} (CVaR_{MGRB}). Hohe CO₂-Preise können aber dazu führen, dass diese deutlich steigen, im Durchschnitt um 21 €/MWh_{el} auf ca. 65 €/MWh_{el} beim CVaR_{VAR} bis ~72 €/MWh_{el} (47 €/MWh_{el} + 25 €/MWh_{el}) beim CVaR_{MGBB}. Mit inkrementeller "Lockerung" der Zielkosten, die das Portfolio im Erwartungswert durchschnittlich erreichen darf, werden statt Braunkohle- eher Steinkohle- und in geringen Mengen Gaskraftwerke zugebaut. Dadurch steigen die erwarteten Stromgestehungskosten. Im Gegenzug sinkt aber das Risiko, diese zu verfehlen. Dieser Vorteil ist beim CVaR_{MGBB} allerdings stark unterproportional - vor allem bei den risikoaversen Portfolios im unteren Drittel der Effizienzlinie. Auch beim CVaR_{VAR} werden mit zunehmender Risikoscheu mehr Steinkohlekraftwerke zugebaut. Im Vergleich zu den Erdgaspreisen stagnieren die Steinkohlepreise im Betrachtungszeitraum und streuen relativ gering. Das risikominimale Portfolio besteht in beiden Modellen hauptsächlich aus Steinkohlekraftwerken.





Abbildung 11: Effiziente Portfolios für Zubaukraftwerke bis 2030 mit CVaR-Portfoliomodell, Szenario 60 plus

Abbildung 11 enthält die Modellergebnisse für effiziente Kraftwerksportfolios im Szenario 60 plus. Im rechten Teil der Abbildung wurden analog die Projektionen der Energieträgerpreise mithilfe des MGBB-Preismodells, im linken Teil mithilfe des VAR_{WEO}-Preismodells erzeugt. Auch im Szenario 60 plus besteht das kostenminimale Portfolio nur aus Braunkohlekraftwerken, die mit steigender Risikoscheu durch Steinkohlekraftwerke substituiert werden. Im Vergleich zum Szenario mit höheren Anteilen erneuerbarer Energien steigt der Anteil der Gaskraftwerke im Zubauportfolio (CVaR_{VAR}) deutlich. Sie werden häufiger eingesetzt, so dass ihre Stromgestehungskosten sinken. Ein Anstieg von Gaskombikraftwerken im Zubauportfolio tritt auch im CVaR_{MGBB} auf. Die Wirtschaftlichkeit von Steinkohlekraftwerken können diese aber aufgrund relativ stärker steigender und streuender Gaspreise im MGBB-Modell nicht erreichen.

6 Wesentliche terminliche und inhaltliche Abweichungen zum Projektantrag

Mit der Bearbeitung des Projekts wurde verzögert begonnen. Die Laufzeit wurde deswegen bis Ende 2013 verlängert.

7 Publikationen und Patente

7.1 Im Rahmen des Projektes entstandene Publikationen

 [1] Gottschling, J.: (anstehend) Portfolioauswahl in der Elektrizitätswirtschaft – Ein lineares Modell zur Auswahl effizienter Kraftwerksportfolios, 10. Fachtagung des VDI Optimierung in der Energiewirtschaft, Köln, November 2013.

7.2 Gemeinsame Publikationen zweier oder mehrerer KW21 Teilprojekte

Gemeinsame Publikationen mehrerer KW21-Teilprojekte sind im Rahmen dieses KW21-Teilprojektes nicht entstanden.

7.3 Weitere Publikationen

- [2] Awerbuch, S.: Market-based IRP: It's easy! Electricity Journal (1995), Vol. 8 (3), S. 50-67.
- [3] Awerbuch, S.: The surprising role of risk and discount rates in utility integrated resource planning. The Electricity Journal (1993), Vol. 6 (3), S. 20-33.
- [4] Awerbuch, S.: Portfolio-Based Electricity Generation Planning. Policy Implications for Renewables and Energy Security. In Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change (2006), Vol. 11 (3), S. 693-710.
- [5] Awerbuch, S.; Berger, M.: Applying Portfolio Theory to EU Electricity Planning and Policy-Making. IEA/EET Working Paper EET/2003/03. Paris: IEA, 2003.
- [6] Awerbuch, S., Berger, M. und Haas, R.: Versorgungssicherheit und Diversifizierung der Energieversorgung in der EU - Mean-Variance Portofolioanalyse des Stromerzeugungsmix und Auswirkungen auf die Bedeutung erneuerbarere Energieträge. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 2/2003, S. 22-23.
- [7] Bar-Lev, D.; Katz, S.: A Portfolio Approach to Fossil Fuel Procurement in the Electric Utility Industry. The Journal of Finance (1976), Vol. 31 (3), S. 933–947.
- [8] Benoot, W. et al: Treating Uncertainty and Risk in Energy Systems with Markal/ Times "TUMATIM". Final Report. Brussels: Belgian Science Policy (2011), S.20.
- [9] Benz, E.; Trück, S.: CO2 Emission Allowances Trading in Europe Specifying a New Class of Assets, Problems and Perspectives in Management (2006), Vol. 4 (3) S. 30-40.
- [10] Bollerslev, T.: On the correlation structure for the generalized autoregressive conditional heteroskedastic process. Journal of Time Series Analysis (1988), Vol. 9, S. 121–131.
- Brooks, C.: Introductory Econometrics in Finance, Cambridge University Press, New York, 2008.
- [12] Daskalakis, G.; Psychoyios, D.; Markellos, R.: Modeling CO₂ emission allowance prices and derivatives: Evidence from the EEX, Athens, 2006, Herunterladbar: http://wcms.uzi.uni-alle.de/download.php?down=1477&elem=1040342.
- [13] Dannenberg, H., Ehrenfeld, W.: Prognose des CO₂-Zertifikatepreisrisikos, Institut für Wirtschaftsforschung Halle, IWH-Diskussionspapiere Nr. 5, 2008, S. 11.
- [14] Doherty, R., Outhred, H., O:Malley, M.: Generation Portfolio Analysis for a Carbon Constrained and Uncertain Future. In: Bazilian, M., Roques, F. (Eds.), Analytical Methods for Energy Diversity and Security, 2008, Elsevier, Amsterdam, S. 151.
- [15] Farrell, J. L.: Portfolio Management. Theory and Application. New York: McGraw-Hill, 1997.
- [16] Gaab, W. et al.: Arbeiten mit ökonometrischen Modellen, Physica-Verlag, Heidelberg, 2004.
- [17] Granger, C.; Newbold, P.: Spourious Regressions in Econometrics. Journal of Econometrics (1974), Vol. 2, S. 111-120.



- [18] Hodrick, R., Prescott, E.: Post-war U.S. business cycles: An empirical investigation, Discussion Paper No. 451, Department of Economics, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, PA, 1980.
- [19] Huang Y.H., Wu J.H.: A Portfolio risk analysis on electricity supply planning. Energy Policy (2007), Vol. 26, S. 627-641.
- [20] International Energy Agency (IEA): Climate Policy Uncertainty and Investment Risk. IEA Publications, 2007.
- [21] International Energy Agency (IEA): World Energy Outlook 2012, OECD Publishing, 2012.
- [22] Jansen, J.C., Beurskens, L.: Portfolio Analysis of the future Dutch Generating Mix. In: Bazilian, M., Roques, F. (Eds.), Analytical Methods for Energy Diversity and Security, 2008, Elsevier, Amsterdam, S. 117.
- [23] Johnson, B. Barz, G. (1999): Selecting Stochastic Processes for Modeling Electricity Prices. Risk Books: Modeling and the Management of Uncertainty, Haymarket House, London, S. 3-22.
- [24] Kleindorfer, P. R., Li, L.: Multi-Period VaR-Constrained Portfolio Optimization with Applications to the Electric Power Sector. The Energy Journal (2005), Vol. 26 (1), S. 1–26.
- [25] Merton, R.C.: Option pricing when underlying stock returns are discontinuous. Journal of Financial Economics (1976), Vol. 3, S. 125-144.
- [26] Paolella, M.; Taschini, L.: An Econometric Analysis of Emission Trading Allowances, 2006, Herunterladbar: http://papers.ssrn.com/sol3/papers. cfm?abstract_id=947055.
- [27] Pindyck, R.: The Log-Run Evolution of Energy Prces. The Energy Journal, 20 (1999), Vol. 2, S. 1-27.
- [28] Poddig, T. et al.: Statistik, Ökonometrie, Optimierung, Uhlenbruch-Verlag, Bad Soden, 2008.
- [29] Rockafellar, R.T., Uryasev, S.: Optimization of Conditional Value-at-Risk. The Journal of Risk, Vol. 2 (3), S. 21-41.
- [30] Spangardt, G.; Meyer, J. (2005): Risikomanagement im Emissionshandel, in: Emissionshandel – ökonomische Prinzipien, rechtliche Regelungen und technische Lösungen für den Klimaschutz. Springer Verlag: Berlin, Heidelberg.
- [31] Sun, N., Ellersdorfer, I., Swider, D.J.: Model-based long-term electricity generation system planning under uncertainty. Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Nanjing, China, April 2008.
- [32] Triskatis (eh. Wagner), M.: CO₂-Emissionszertifikate Preismodellierung und Derivatebewertung, Universität Karlsruhe Dissertation 2007.
- [33] Vasicek, O.: An Equilibrium Characterization of the Term Structure. Journal of Financial Economics (1977), Vol. 5, S. 177-188.



- [34] Wissel, S.; Fahl, U.; Blesl, M.; Voß, A.: Erzeugungskosten zur Bereitstellung elektrischer Energie von Kraftwerksoptionen in 2015, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart; IER Working Paper No. 7, Stuttgart, 2010.
- [35] Zenios. S. Practical Financial Optimization: Decision Making for Financial Engineers, Blackwell Publishing, Cambridge, 2008, S. 43.

7.4 Im Rahmen des Projektes entstandene Patente

Patente sind im Rahmen dieses KW21 Teilprojektes nicht entstanden.

8 Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses

8.1 Studentische Mitarbeiter

- Simon Mai
- Martin Steurer

8.2 Studien- Semester- und Bachelorarbeiten

- Bachelor-Projektarbeit in kleinen Gruppen zum Thema: Identifikation und monetäre Bewertung von Standortkriterien bei Kraftwerksinvestitionen
 - · Simon Wollensak, Technologiemanagement
 - Sebastian Teichert, Technologiemanagement
 - Marten Kunath, Technologiemanagement
 - Fabian Grajer, Technologiemanagement
 - Markus Reutter, Technologiemanagement
 - Nicolas Bergengruen, Maschinenbau

8.3 Diplom- und Masterarbeiten

- Andreas Reiser (Technisch orientiertet BWL Uni Stuttgart, Diplomarbeit): Möglichkeiten der Regelung thermischer Kraftwerke mit besonderer Berücksichtigung der Anfahrkosten
- Melanie Dürr (Technisch orientiertet BWL Uni Stuttgart, Diplomarbeit): Vergleich von Prognosemodellen der Energieträgerpreise für Erdgas und Steinkohle
- Franziska Deutschmann (Wirtschaftsmathematik Uni Halle-Wittenberg, Masterarbeit): Forecasting Natural Gas and Coal Prices Using Multiple Time Series Analysis: A VECM Approach



8.4 Promotionen

Dipl. Ing. Johann Gottschling: (Laufend) Portfolioauswahl in der Elektrizitätswirtschaft

9 Forschungsprogramme des Bundes und der EU

9.2 Angaben, ob weitere Drittmittel zum Projektthema eingeworben wurden, insbesondere aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen des Bundes und der EU

Es wurden keine weiteren Drittmittel zum Projektthema eingeworben.

9.3 Geplante Antragsstellung bzw. künftige Förderung aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen von Bund, EU etc. sowie allgemeinen Förderprogrammen (z.B. DFG)

Es wurden keine Forschungsanträge zum Projektthema gestellt.



Arbeitskreis Energiewirtschaft

Projekt: BW W 21E

Investitionsentscheidungen zur optimalen Risikodiversifikation von Kraftwerksbetreibern

Projektleiter:	Prof. DrIng. Alfred Voß Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung Universität Stuttgart
Mitarbeiter:	DiplIng. Johann Gottschling DiplWirtIng. Ninghong Sun
Finanzierung:	EnBW Energie Baden-Württemberg AG E.ON Energie AG

1 Ausgangssituation

Die Liberalisierung der Elektrizitätsmärkte in Europa stellt die Energieversorgungsunternehmen (EVU) vor neue Herausforderungen. Vor dem Hintergrund sich ändernder politischer Rahmenbedingungen bestehen Marktrisiken hinsichtlich der weiteren Entwicklung der Brennstoffpreise, CO₂-Zertifikate, der Investitionskosten und der Elektrizitätsnachfrage, verstärkt durch die fluktuierende Einspeisung regenerativer Energien. Etwaige Folgen solcher Risiken können nicht mehr über den Marktpreis uneingeschränkt an die Endverbraucher überwälzt werden. Um diesen Herausforderungen Rechnung zu tragen, haben Kraftwerksbetreiber die Möglichkeit, ihr Erzeugungsportfolio so zu strukturieren, dass der erwartete risikogewichtete Gewinn oder die erwartete risikogewichtete Rendite aus dem Anlagenbetrieb maximiert wird.

Hierzu kann die Bewertungsmethode der Portfolioauswahl zur Identifizierung desjenigen optimalen Portfolios verwendet werden, bei dem die ausgewählten Kraftwerksprojekte zu einer insgesamt maximalen risikogewichteten Gewinn- oder Renditeerwartung führen. Im Rahmen dieses Vorhabens soll die aus dem Bereich der Finanzwissenschaft stammende Methode der Portfoliooptimierung für die Investitionsentscheidungen von Energieversorgungsunternehmen erweitert und exemplarisch angewendet werden.



1.1 Konventionelle modellgestützte Methoden der Investitionsplanung

Das Optimierungsproblem innerhalb traditioneller Herangehensweisen zur Beurteilung der Vorteilhaftigkeit einer Investition besteht allgemein darin, eine Zielfunktion, die gewöhnlich die Gesamtkosten darstellt, mit bestimmten Nebenbedingungen zu minimieren.

Dieser Minimalkostenansatz kann verwendet werden bei relativer Kostensicherheit, niedrigen Technologiefortschrittsraten und Preisen, die auf rein deterministischen Annahmen beruhen [2][3]. Bedingt durch die fortschreitende Liberalisierung sind die Entscheidungsträger in der Elektrizitätswirtschaft allerdings mit einem zunehmend dynamischen und unsicheren Umfeld konfrontiert. Ungünstige Auswirkungen unsicherheitsbehafteter Einflussgrößen können nicht mehr auf den Elektrizitätspreis überwälzt werden. Angesichts dieser Konditionen ist es zu hinterfragen, ob es allein auf Basis des Minimalkostenansatzes heute noch sinnvoll ist, mittel- bis langfristig fundierte Investitionsalternativen zu identifizieren [4].

Vor diesem Hintergrund gewinnen Methoden der Investitionsrechnung, die die Aussage der klassischen Kapitalwertmethode oder des Life Cycle Costing ergänzen, zunehmend an Bedeutung. Eine solche Bewertungsmethode ist die Portfolioauswahl zur Identifizierung desjenigen (optimalen) Portfolios, bei dem die ausgewählten Kraftwerksprojekte zu einer insgesamt maximalen risikogewichteten Renditeerwartung führen. Das Gesamtrisiko kann dabei durch Diversifizierung verringert werden. Die theoretischen Grundlagen werden nachfolgend dargestellt.

1.2 Portfoliooptimierung als innovativer Ansatz der Ausbauplanung von Elektrizitätserzeugungsanlagen

Mit seiner Arbeit zur Portfolioauswahl hat Harry Markowitz Anfang der fünfziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts die Denkweise der Vermögensverwaltung grundlegend verändert. Bis zum damaligen Zeitpunkt stand die reine Gewinnmaximierung mit Hilfe verschiedener Vermögensgegenstände im Fokus der Finanzwissenschaften. Markowitz hat mit einem neuen methodischen Ansatz darauf hingewiesen, dass, neben einer Maximierung der Rendite, die gleichzeitige Minimierung des zu erwartenden Risikos (repräsentiert durch die Varianz der Rendite) ein Ziel der Investitionsplanung sein sollte: "[...] the investor does (or should) consider expected return a desirable thing and variance of return an undesirable thing" [13]. In der Zwischenzeit ist der Gedanke der Risikodiversifizierung zu einem zentralen Element der Planung von Finanzinvestitionen geworden. Hierauf basierende Bewertungsmethoden wurden kontinuierlich erweitert. Die Portfoliotheorie wurde danach schrittweise auch auf die Risikodiversifizierung bei der Investitionsplanung für reale Vermögensgegenstände ausgeweitet [8].

Die theoretischen Grundlagen zur Mean-Variance-Portfoliooptimierung werden schematisch mithilfe von Abbildung 1 dargestellt. In der Ausgangslage besitze ein EVU die Möglichkeit, in drei riskante Erzeugungstechnologien (A, B, C) zu investieren. Das EVU kann entscheiden, nur in eine Erzeugungstechnologie zu investieren oder ein Portfolio aus Kombinationen dieser Technologien zu bilden. Die Gesamtmenge möglicher Portfolios – in Abbildung 1 werden diese jeweils durch einen roten Punkt repräsentiert – bildet eine Punktwolke im Rendite-Risiko-Raum. Die einzelnen Portfolios innerhalb dieser möglichen Menge unterscheiden sich durch ihre jeweiligen Anteile der Erzeugungstechnologie. Aus



der Gesamtmenge der möglichen Portfolios sind die effizienten darunter dadurch gekennzeichnet, dass zu einer vorgegebenen Rendite kein anderes Portfolio existiert, das ein geringeres Risiko aufweist, bzw. zu einem bestimmten Risiko keine höhere Rendite erzielt werden kann. In der schematischen Darstellung wäre demnach das Portfolio B ineffizient, da eine höhere Rendite möglich ist, ohne ein zusätzliches Risiko eingehen zu müssen. Durch eine andere Gewichtung der Bestandteile sind Portfolios denkbar, die bei gleicher Rendite ein geringeres Risiko aufweisen.



Abbildung 1: Effizienzlinie und Nutzenfunktion im Rendite-Risiko-Raum

Die Effizienzlinie ist die Verbindungslinie der effizienten Portfolios und bildet die obere Beschränkung des Rendite-Risiko-Raums. Sie kann in einem Optimierungsprozess hergeleitet werden. Sie ist unabhängig von den persönlichen Präferenzen des Entscheidungsträgers und kann objektiv für alle Entscheider verwendet werden. Je nach Risikoneigung eines Entscheidungsträgers wird aus den effizienten Portfolios entweder ein weniger riskantes Portfolio gewählt, allerdings auf Kosten der erwarteten Rendite, oder ein profitableres Portfolio, für das im Gegenzug jedoch ein höheres Gesamtrisiko in Kauf genommen werden muss. Das individuell optimale Portfolio ist der Tangentialpunkt der Effizienzlinie und der Nutzenfunktion des Entscheidungsträgers. Letztere kann durch ein Feld von Indifferenzkurven repräsentiert werden. Gegenüber allen Rendite-Risikokombinationen auf einer Indifferenzkurve ist der Entscheidungsträger indifferent, wobei höher gelegene Indifferenzkurven bevorzugt werden. Dies lässt sich damit begründen, dass für ein gegebenes Risiko höhere Renditen niedrigeren Renditen vorgezogen werden [19]. In dem Beispiel aus Abbildung 1 würde demnach ein extrem risikoaverser Entscheidungsträger das Minimum-Varianz-Portfolio (Punkt D) wählen. Im Vergleich zu Investoren mit einer risikoneutraleren Einstellung wäre die Rendite, die sein gewähltes Portfolio generieren würde, von untergeordnetem Interesse. Auf der Gegenseite sähe ein risikoneutraler Anleger in Portfolio (A) die für ihn optimale Wahl.

2 Projektziele

Das Projektziel besteht in der Entwicklung eines Modells auf Basis der Portfoliotheorie, um die Kraftwerksinvestitionsentscheidungen eines exemplarischen Investors, z. B. eines EVU zur Risikodiversifizierung vor dem Hintergrund volatiler Brennstoff- und CO₂-Preise und unsicherer politischer Rahmenbedingungen zu unterstützen. Mit dem Modell ist es möglich, einerseits Investitionsentscheidungen des Investors in Hinsicht auf ein langfristig tragfähiges Erzeugungsportfolio bei unsicherer Brennstoff- und CO₂-Preisentwicklung zu bewerten und andererseits Aussagen über die wettbewerbsfähige Position des Investors in einem unsicheren Marktumfeld zu liefern. Die Maximierung des erwarteten risikogewichteten Gewinns eines Kraftwerksbetreibers wird dabei einerseits von der Entwicklung der unsicheren Brennstoff-, CO₂- und Elektrizitätspreise, andererseits von der jeweiligen Einsatzcharakteristik des Kraftwerksparks bestimmt. Da sich die Einsatzcharakteristik konventioneller Kraftwerke u. a. mit der Zunahme fluktuierender Einspeisung erneuerbarer Energie verändert, liegt eine besondere Herausforderung bei der Modellanalyse auf diesem Aspekt.

3 Vernetzung

3.1 Vernetzung innerhalb KW21

Neben einem Informationsaustausch im Rahmen der regelmäßig statt gefundenen Projektreffen wurden Rahmendaten zwischen den Projektmitarbeitern innerhalb des Arbeitskreises Energiewirtschaft ausgetauscht und abgestimmt.

3.2 Vernetzung außerhalb KW21

Eine Vernetzung außerhalb von KW21 existiert nicht.

4 Vorgehensweise und Methodik

Für die Bearbeitung dieses Projekts wurde zunächst die bestehende Risikoexposition eines exemplarischen Energieversorgungsunternehmens (EVU) untersucht. Dazu wurden die Kapitalverflechtungen der deutschen Kraftwerksbetreiber analysiert und spezifische Standortbedingungen ermittelt, die einen Einfluss auf die Investitionsentscheidungen eines Investors haben können. Für die Bestimmung der Risikoexposition eines exemplarischen EVU ist ferner die zukünftige Entwicklung der die variablen Erzeugungskosten bestimmenden Energieträger- und CO₂-Preise entscheidend. Für die Quantifizierung des Brennstoffpreis- und CO₂-Preisrisikos wurden unterschiedliche Modellansätze zur direkten Preismodellierung aus Vergangenheitsdaten geschätzt und Preisprojektionen erstellt. Die simulierten Preise werden als Eingangsgröße für die Portfoliomodelle in den Teilprojekten BW L 21E und BW W 21E benötigt. Eine ausführliche Diskussion der untersuchten stochastischen Preismodelle, sowie die Ergebnisse der Parameterschätzung und Simulation sind in [9] zu finden.



5 Projektergebnisse und Ausblick

5.1 Modellierung der Preisrisiken

Neben den in der Finanzmathematik weit verbreiteten stochastischen Prozessen zur Modellierung der Preisentwicklung auf Energiemärkten, wie die Geometrische Brownsche Bewegung (GBB) und das Ornstein-Uhlenbeck Mean Reversion Modell (OU), wurden aufgrund der Dynamik und Heteroskedastizität der historischen handelstäglichen CO₂-Renditen zusätzlich Regime-Switching (RS) [5][20], GARCH (Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedasticity)- [14] und Jump-Diffusion (JD) [7][20] Prozesse untersucht. Bei letzterem wird der Prozess der GBB um eine Komponente für Preissprünge ergänzt. Alle Preismodelle wurden auf Basis realer historischer Spotpreise für Emissionsrechte (EUA) an der European Energy Exchange (EEX) vom 25.03.2008 bis 31.05.2012 geschätzt. Die aufgrund sinkender Emissionsziele zu erwartenden Preissteigerungen bei den Emissionsrechten spiegeln sich nicht in den Simulationsergebnissen wieder. Die Preisprojektionen mit dem GBB- und JD-Modell sind aufgrund der negativen Drift fallend. Bei der Simulation mit dem RS-Modell stagnieren die CO₂-Preise in ihrem Erwartungswert auf dem Ausgangsniveau von ca. 6 €/t. Bei dem Mean Reversion Modell streben die Preise ihr langfristiges Mittel von ca. 7 €/t an. Bei dem GARCH-Modell steigen die CO₂-Preise zwar in ihrem Erwartungswert deutlich auf ca. 60 €/t im Jahr 2030. Der Preisanstieg ist jedoch wenigen Szenarien mit extremen Preisverläufen geschuldet. In der Mehrheit der simulierten Szenarien tendieren die Preise analog zum GBB- und JD-Modell gegen null.

Für die vorliegende Arbeit wird daher das geschätzte Mean Reversion Modell mit einem externen Preistrend gekoppelt. Charakteristisch am Mean Reversion Modell ist, dass die zukünftigen Preisänderungen von CO_2 -Zertifikaten nur vom Preis der Vorperiode abhängig sind. Die Preise kehren dabei stets zu ihrem langfristigen Mittelwert zurück, um den sie stochastisch in Abhängigkeit der Prozessvolatilität schwanken. Wie schnell diese Rückkehr erfolgt, wird durch die Mean Reversion Geschwindigkeit bestimmt. Als langfristiger Mittelwert, dem die Preise zustreben, wird jedoch in diesem Fall nicht der geschätzte (konstante) Wert eingesetzt, sondern der Preistrend aus dem World Energy Outlook WEO_{2012} new policies Szenario [12]. In Abbildung 2 sind der Erwartungswert und die Perzentile der Ordnung P_{05} und P_{95} der CO_2 -Preisprojektionen mit diesem modifizierten Modell dargestellt. Der Preisverlauf des Erwartungswerts entspricht dabei dem Preistrend aus dem gewählten WEO-Szenario.





Abbildung 2: Simulierte Preisbänder für EUA in Monatsmitteln von 2013-2030

Um ein geeignetes Modell zur Simulation der Energieträgerpreise zu finden, wurden die Preiszeitreihen der monatlichen inflationsbereinigten Einfuhrpreise von Erdöl. Erdgas und Steinkohlen von 1970 bis 2012 untersucht. Seit Beginn der 1980er Jahre scheinen vor allem die Erdgaspreise den Erdölpreisen mit einer Verzögerung von bis zu einem halben Jahr zu folgen. Ein simultaner Verlauf bei den Erdöl- und Steinkohlepreisen kann dagegen vor allem in der Zeit vor 1987 und nach 2000 beobachtet werden. Im Hinblick auf die Preismodellierung finden sich in der Literatur unterschiedliche Ansätze. Fundamentalanalytische Modelle eignen sich nur bedingt für längerfristige Preisprognosen. Schwierigkeiten bereit dabei die Prognose der angebots- und nachfrageseitigen Einflussvariablen [15], z.B. die Entwicklung der Produktionskapazitäten oder das weitere Bevölkerungs- und Einkommenswachstum und damit verbunden die weitere Entwicklung der Energienachfrage. Daneben kann die Preisentwicklung über stochastische Prozesse und Zeitreihenmodelle beschrieben werden. Um die Interdependenzen bei den Energieträgerpreisen aus der Vergangenheit zu berücksichtigen, werden multivariate Ansätze gewählt. Für die Projektion zukünftiger Preispfade werden zwei Modelle, eine multivariate GBB (MGBB) und ein Vektor-Autoregressives (VAR) Modell, geschätzt und simuliert. Von der univariaten GBB unterscheidet sich die multivariate Version dadurch, dass korrelierte Zufallszahlen, die mithilfe der Cholesky-Faktorisierung erzeugt wurden, als Störterm ins Modell eingehen.

Charakteristisch am VAR-Modell ist, dass die Preisentwicklung eines Energieträgers nicht nur in Abhängigkeit der eigenen vergangenen Preise, sondern auch abhängig von der Entwicklung der mitbetrachteten Brennstoffpreise modelliert wird.

$$\begin{pmatrix} p_{oil} \\ p_{gas} \\ p_{coal} \end{pmatrix}_{t} = c + \sum_{i=1}^{n} A_{i} * \begin{pmatrix} p_{oil} \\ p_{gas} \\ p_{coal} \end{pmatrix}_{t-1} + \varepsilon_{t} ; A_{i} = \begin{bmatrix} oil \rightarrow oil & gas \rightarrow oil & coal \rightarrow oil \\ oil \rightarrow gas & gas \rightarrow gas & coal \rightarrow gas \\ oil \rightarrow coal & gas \rightarrow coal & coal \rightarrow coal \end{bmatrix}$$



So würde z.B. der Erdgaspreis zu einem Zeitpunkt t (p_{aas}) nicht nur von den vorausgehenden Erdgaspreisen beeinflusst, sondern auch von den vorausgehenden Steinkohle- und Erdölpreisen. Autoregressive Matrizen (A) erfassen dabei die gegenseitigen Abhängigkeiten und werden aus Vergangenheitspreisen der Energieträger geschätzt. Das Modell wird ergänzt um einen Konstantenvektor c und multivariates weißes Rauschen ε_{c} . Die Parameterschätzung und Simulation des VAR-Modells erfolgt mit trendbereinigten (gefilterten) Preiszeitreihen. Diese werden durch Anwendung des Hodrick-Prescott (HP) Filters [11] erzeugt, der nicht-lineare Trends der Energieträgerpreise von der zyklischen Komponente (Konjunkturschwankungen) und irregulären Schwankungen trennt. Um mit den CO₂-Preisen konsistente Preisszenarien zu erhalten, wird nach der Simulation der trendbereinigten Preise jedoch nicht der historische Trend addiert, der zuvor durch die HP-Filterung beseitigt wurde, sondern der jeweilige Preistrend entsprechend dem WEO2012 new policies Szenario [12]. Das MGBB-Modell hingegen wird nicht mit einem externen Trend verknüpft. Die Preisbänder und die Perzentile der Ordnung Pos und Pos der Projektionen mit dem VAR_{MEO}-Energieträgerpreismodell sind im rechten Teil von Abbildung 3 dargestellt. Die mithilfe des rein aus Vergangenheitsdaten parametrisierten MGBB-Energieträgerpreismodells simulierten Preisbänder sind gegenübergestellt. Neben den absolut höheren Erwartungswerten der MGBB-Erdöl- und -Erdgaspreise steigt im Vergleich zu den VAR_{WEO}-Preisen die Volatilität im Zeitverlauf.

Die Kosten für Braunkohle- und Kernbrennstoff werden für den Betrachtungszeitraum konstant angenommen und orientieren sich in ihrer Höhe mit 4 bzw. 3.7 \in_{2010} /MWh_{th} an den Ergebnissen in [21].



Abbildung 3: Projektionen der Erdöl-, Erdgas- und Steinkohlepreise mit dem MGBBund VAR-Modell (rechts)

5.2 Methodik und vorliegende Ergebnisse der Portfolioanalyse

Im Rahmen der Modellentwicklung wurde ein Modellansatz entwickelt, mit dem effiziente Kraftwerksportfolios für einen Betrachtungszeitraum bestimmt werden können. Das entwickelte lineare Modell zur Auswahl effizienter Kraftwerksportfolios verwendet als Risikomaß den Conditional Value at Risk (CVaR) der Verlustverteilung eines Kraftwerksportfolios (vgl. [17][21]). Für die Bestimmung der Verlustverteilung sind vorausgehende Rechnungen mit einem Elektrizitätsmarktmodell erforderlich, um eine Elektrizitätspreisverteilung als bestimmenden Faktor für die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Investitionsoptionen zu gewinnen. Eine detaillierte Beschreibung des Elektrizitätsmarktmodells findet



sich in [18]. Da das Elektrizitätsmarktmodell vordergründig für die Bestimmung einer Elektrizitätspreisverteilung in Abhängigkeit kombinierter Brennstoff- und CO₂-Preisszenarien eingesetzt wird, wofür mehrere Modellläufe nötig sind, mussten Vereinfachungen vorgenommen werden, um die Rechendauer zu verkürzen. Es wird daher eine lineare Version des Modells verwendet und Deutschland wird isoliert betrachtet. Interregionale Effekte durch Stromaustausch zwischen den angrenzenden europäischen Teilmärkten bleiben damit unberücksichtigt. Der Wärmemarkt wird nicht modelliert. Weiterhin wird zugunsten der Rechendauer auf kraftwerksspezifische intertemporale Restriktionen, wie z.B. Mindeststillstands- Mindestbetriebs- und Anfahrzeiten, verzichtet. Die thermischen Kraftwerke und Speicher im Modell werden nicht blockscharf erfasst, sondern zu Kraftwerksklassen aggregiert. Die installierte Kapazität der bestehenden Kraftwerke wurde entsprechend den letzten veröffentlichten Kraftwerkslisten von Bundesnetzagentur und Umweltbundesamt aktualisiert. Der Anteil der erneuerbaren Energien im System wird modellexogen vorgegeben entsprechend den Szenarien 80 minus und 60 plus, die innerhalb des Arbeitskreises Energiewirtschaft abgestimmt wurden. Die Zahl im Szenarionamen steht für den Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch im Jahr 2050. Minus (plus) steht für einen sinkenden (steigenden) Stromverbrauch im Zeitverlauf. Diese Rahmendaten sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

		2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Bruttootrompoohfrogo	60 plus	621	621	621	622	622	628	633	634	635
Bruttostronnachinage	80 minus	621	608	617	630	580	575	561	538	533
	60 plus	15%	22%	28%	32%	38%	43%	49%	54%	60%
Aniellee	80 minus	15%	25%	35%	43%	50%	58%	65%	73%	80%

Tabelle 1: KW 21-Rahmendaten für die Modellierung effizienter Portfolios

Die CO₂-Preisprojektionen entsprechen dem simulierten Mean Reversion-Modell mit externem WEO-Trend. Die Energieträgerpreisprojektionen basieren auf dem VAR-Modell mit externem WEO-Trend.

Mithilfe der Elektrizitätspreis- und Brennstoffpreisverteilung sowie den technischen und ökonomischen Rahmendaten der für die zur Investition verfügbaren Technologieoptionen wird im nächsten Schritt für jede Technologie und jedes Jahr innerhalb des Betrachtungszeitraums eine von diesen Preisszenarien abhängige Gewinnverteilung ermittelt. Diese wird für das CVaR-Portfoliomodell benötigt, mit dem aus Sicht eines Kraftwerksinvestors effiziente Kraftwerksportfolios bestimmt werden können (vgl. Abbildung 1). Als Risikomaß im Portfoliomodell wird der lineare Conditional Value at Risk verwendet. Der Value at Risk ("VaR) ist derjenige Verlust, der zu dem festgelegten Konfidenzniveau α nicht überschritten wird. Zur Bestimmung des CVaR wird noch der Erwartungswert der Verluste darüber hinaus addiert (vgl. Abbildung 4 und die nachfolgenden Modellgleichungen). Als Modellergebnis wird in mehreren Optimierungsschritten das jeweils CVaR-minimale Kraftwerksportfolio zum jeweiligen Zielgewinn des Investors bestimmt. Technologien, die im Erwartungswert der Gewinnverteilung über den gesamten Betrachtungszeitraum einen positiven Gewinn aufweisen, kommen als Investitionsoption für das Portfolio in Frage. Um effiziente Kraftwerksportfolios zu bestimmen, wird nun im Portfoliomodell zu vorgegebenen, inkrementell steigenden Gewinnvorgaben für das Portfolio das zugehörige Risiko (CVaR_{nesant}) in Form des Verlustrisikos minimiert (vgl. Gleichungen I,II) und die zugehörigen Portfolioanteile der Technologie, x(i,a), bestimmt.





Abbildung 4: Verlustverteilung und Conditional Value at Risk (CVaR)

Die Gewinnvorgabe ist dabei der Portfoliogewinn, der mithilfe des Portfolios mindestens erzielt werden muss (Gleichung III). Er ist eine Kombination erwarteter Technologiegewinne, gewichtet mit deren Anteilen im Portfolio, die modellendogen ermittelt werden. Für die Bestimmung des Erwartungswerts des Portfoliogewinns wird mit der jeweiligen Wahrscheinlichkeit der Energieträgerpreis- $(pr_{c}(s1) \text{ und } CO_{c}-Preisszenarien (pr_{c}(s2) \text{ gewich$ tet. Dieser Mindestgewinn des Portfolios muss dabei im ersten Optimierungsschritt mindestens so hoch sein wie der kleinste erwartete Gewinn der Technologieoptionen im gesamten Betrachtungszeitraum und analog im letzten Optimierungsschritt so groß sein, wie der höchste erwartete Gewinn. Daraus folgt, dass das Portfolio mit dem höchsten erwarteten Gewinn ein technologiereines Portfolio sein muss. Die Inkremente dazwischen sind frei wählbar und richten sich nach der Vorgabe, aus wie vielen Punkten (Technologieportfolios) die Effizienzlinie zusammengesetzt sein soll. Jeder Punkt auf der Linie erfordert demnach eine Optimierung mit dem Portfoliomodell. Um zeitübergreifende effiziente Technologieportfolios zu ermöglichen, müssen Technologien, in die das Modell investiert, innerhalb eines Optimierungsschritts beibehalten werden. Der Investor realisiert Verluste, wenn die jährlichen szenarioabhängigen Gewinne des Kraftwerksportfolios niedriger sind als der erwartete Gewinn des Portfolios (Gleichung VI). Für die Messung des jährlichen Verlustrisikos wird der Conditional Value at Risk (CVaR) zu einem festgelegten Konfidenzniveau a von 0.95 (Gleichung II) verwendet und über den Betrachtungszeitraum minimiert. Die Zielfunktion und wesentliche Nebenbedingungen des Portfoliomodells sind nachfolgend aufgelistet. Die Indizes i, a, s1 und s2 stehen für die Technologie, das Jahr, das Brennstoffpreisszenario und das CO₂-Preisszenario.



(1)
$$CVaR_{gesamt} = \sum_{a} CVaR_{im \ Jahr \ a}(a) \rightarrow min!$$

s.t.

 $(II) \ CVaR_{im \ Jahr \ a}(a) = \ VaR_{im \ Jahr \ a}(a) + \sum_{s_{1,s_{2}}} pr_{f}(s_{1}) * pr_{c}(s_{2}) * \frac{Verluste_{>VaR \ im \ Jahr \ a}(s_{1,s_{2},a)}}{1-\alpha}$

(III)
$$\sum_{i} \sum_{a} Erwarteter Jahresgewinn(i, a) * x(i, a) \ge Mindestgewinn$$

(IV)
$$Verluste(s1, s2, a)$$

= $\sum_{i} Erwarteter Jahresgewinn(i, a) * x(i, a) - \sum_{i} Gewinn(i, s1, s2, a) * x(i, a)$

(V)
$$Verluste_{>VaR im \ Jahr a}(s1, s2, a) = Verluste(s1, s2, a) - VaR_{im \ Jahr a}(a)$$

Dieses Modell wurde exemplarisch mit den Rahmenannahmen aus den Szenarien 60 plus und 80 minus für den Zeitraum 2013 bis 2030 angewendet. Es werden zunächst keine Bestandsanlagen im Portfolio des Kraftwerksbetreibers berücksichtigt. Eine diesbezügliche Modellerweiterung ist Gegenstand weiterer Modellanalysen.

	Kanarität	Spezifische	Fixe	Variable	Nutrungadayor	Jahr	
	карадна	Investitionskosten	Betriebskosten	Betriebskosten		der	Wirkungsgrad
	[MW]	[EUR/MW]	[EUR/MW]	[EUR/MW]	[a]	Verfügbarkeit	
COAL10	800	1400	35	4	40	2010	0,46
COAL15	800	1300	35	4	40	2015	0,46
COAL20	800	1300	35	4	40	2020	0,465
LIGN10	1050	1600	39	4,4	40	2010	0,445
LIGN15	1050	1500	39	4,4	40	2015	0,45
LIGN20	1050	1500	39	4,4	40	2020	0,46
GASGT10	150	355	12	2,08	30	2010	0,38
GASGT20	150	325	12	2,08	30	2020	0,39
GASCC10	800	700	19	2	30	2010	0,59
GASCC15	800	700	19	2	30	2015	0,6
GASCC20	800	700	19	2	30	2020	0,61

Tabelle 2: Technische und ökonomische Rahmendaten der Technologieoptionen

Als Investitionsoptionen für das Kraftwerksportfolio stehen für den Betrachtungszeitraum 2013-2030 folgende elf Kraftwerksklassen zur Verfügung: Braunkohlekraftwerke (LIGN10, LIGN15, LIGN20), Steinkohlkraftwerke (COAL10, COAL15, COAL20) und Gaskraftwerke (GASCC10, GASCC15, GASCC20, GASGT10, GASGT20). Die Zahl steht für das Jahr der Verfügbarkeit, z.B. entspricht die Kraftwerksklasse LIGN15 einem Braunkohlekraftwerk, das ab dem Jahr 2015 für eine Investition in Frage kommt. GASCC20 steht für ein Gaskombikraftwerk ab 2020, GASGT20 entsprechend für eine Gasturbine. Wesentliche technische und ökonomische Rahmendaten für diese Kraftwerksklassen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Investitionsentscheidungen zur optimalen Risikodiversifikation von Kraftwerksbetreibern



Weder im Szenario *80 minus* noch im Szenario *60 plus* hat eine der verfügbaren Technologieoptionen einen positiven erwarteten Gewinn über den gesamten Betrachtungszeitraum. Keine der Technologien kommt daher als Investitionsoption in Frage, da das niedrige Niveau der Elektrizitätspreise keine ausreichend hohen Deckungsbeiträge garantiert. In Abbildung 5 sind die durchschnittlichen Elektrizitätspreise im Betrachtungszeitraum für die beiden Szenarien zusammengefasst. Die Elektrizitätspreise sind Modellergebnis des Fundamentalmodells und basieren jeweils auf Energieträgerpreisprojektionen aus dem VAR_{WEO}-Preismodell. Die niedrigeren Preise im Szenario *80 minus* ab dem Jahr 2026 gehen auf das deutliche Absinken der Stromnachfrage ab diesem Zeitpunkt zurück.



Abbildung 5: Elektrizitätspreise im Zeitverlauf

Um das Modell exemplarisch anwenden zu können, werden die Elektrizitätspreise des 60 plus Szenarios erhöht. Bei einer Erhöhung um 10 % würden die Braunkohlekraftwerke rentabel werden. Bei 15 % höheren Strompreisen könnten zusätzlich Steinkohlekraftwerke (COAL15 und COAL20) und ein Gaskombikraftwerk (GASCC20) einen positiven Gewinn erzielen. Die in Abbildung 6 dargestellten Ergebnisse des CVaR-Portfoliomodells beruhen auf einer exemplarischen Modellanwendung mit 15 % höheren Elektrizitätspreisen. Wie zu erkennen ist, bestimmt das Modell für den risikoaversen Investor (am weitesten links stehender Punkt der Effizienzlinie) ein Technologiemix aus Erdgas und Braunkohle. Dieses Portfolio ist risikominimal, weist aber auch den niedrigsten erwarteten durchschnittlichen Portfoliogewinn im Betrachtungszeitraum auf. Es ist kein technologiereines Portfolio.





Abbildung 6: Effiziente Kraftwerksportfolios auf Basis von VARWEO-Energieträgerpreisen

Die Mindestanforderung an den erwarteten Portfoliogewinn könnte zwar auch mit einem reinen GASCC-Portfolio zielgenau erwirtschaftet werden, die Hinzunahme von Braunkohle erfüllt dieses Ziel aber gleichermaßen, birgt jedoch ein geringeres Verlustrisiko. Mit steigenden Anforderungen an den erwarteten Portfoliogewinn werden Gaskraftwerke zunehmend durch Braunkohlekraftwerke ersetzt. Diese Portfolios weisen aber aufgrund relativ stärker streuender CO₂-Preise ein höheres Verlustrisiko auf. Das effiziente Portfolio, das die Effizienzlinie auf der rechten Seite abschließt, muss ein technologiereines Portfolio sein. Dieses braunkohlereine Portfolio würde ein risikoneutraler Investor als das für ihn optimale Portfolio erachten.

Für konkrete Investitionsentscheidungen sind die individuellen Kosten einer Kraftwerksinvestition aus Sicht des Investors von Bedeutung. Diese werden auch durch standortabhängige Faktoren mitbestimmt. Neben den Kühlbedingungen am Standort und den Erschließungskosten spielen die Infrastrukturanbindung und damit verbunden die Kosten der Brennstoffversorgung eine wichtige Rolle. Spezifische Standortbedingungen können Eingang in die Portfolioanalyse finden, wenn konkrete Investitionsentscheidungen zu bewerten sind. Dazu ist aber eine individuelle Analyse für jeweils konkrete Standorte erforderlich. Diese kann hier nicht geleistet werden. Die ökonomische Bewertung von Standortfaktoren kann hier nur verallgemeinert dargestellt werden und beschränkt sich auf eine Analyse der Standortabhängigkeit der Brennstoffkosten.



Braunkohle wird kraftwerksnah verstromt, da ein Transport über größere Strecken aufgrund des geringen Heizwerts unwirtschaftlich wäre. Standortabhängige Unterschiede in den Brennstoffkosten sind daher eher auf die individuellen Förderkosten am Standort zurückzuführen. Informationen dazu liegen nicht vor.

Im Jahr 2005 z. B. wurden rund 40 Mio. Tonnen Steinkohle importiert. Davon wurde ein geringer Anteil von zwölf Prozent direkt per Bahn angeliefert. Der Rest von 88 Prozent wurde über den Seeweg eingeführt. Die Herkunft der Steinkohle nimmt dabei Einfluss auf den Importhafen und die weitere Transportkette hin zum Kraftwerk. Etwa zwei Drittel der per Schiff importierten Kohlen werden über die ARA-Häfen (Amsterdam, Rotterdam, Antwerpen) eingeführt, ein Drittel über deutsche Nord- und Ostseehäfen. Wie Abbildung 7 zeigt, erreichen 27 Prozent der Importkohle das Kohlelager direkt von dem Hochseeschiff aus, ohne dass ein weiterer Binnentransport nötig ist. Dies ist nur möglich bei Steinkohle-kraftwerken mit einem Standort in unmittelbarer Nähe zu den deutschen Küsten.



Abbildung 7: Transportwege für Steinkohle in Deutschland, eigene Darstellung auf Basis von Angaben in [16].

Der überwiegende Teil der in Deutschland verbrauchten Steinkohle (40 Prozent) wird aber nach Anlandung in einem Seehafen über große Schubverbände und Binnenschiffe an den Kraftwerksstandort transportiert [10][16]. Während für Küstenkraftwerke an der Nord- und Ostsee nur Entladekosten anfallen, addieren sich für Kraftwerke, die von den ARA-Häfen (Amsterdam, Rotterdam, Antwerpen) aus beliefert werden, der Weitertransport mit Bahn oder Binnenschiffen. In diesem Fall kommen noch jeweils Hafenumschlags- und Streckenkosten hinzu [6].

Für die regionenscharfe Bestimmung von Transportkosten für Kraftwerkssteinkohle wurden zunächst die jeweiligen Versorgungswege für Kraftwerke dieses Typs recherchiert. Die Gesamtkosten für den Brennstofftransport setzen sich aus den Einzelkosten entlang der Transportkette zusammen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 8 dargestellt. Angegeben sind jeweils die Transportkosten in EUR/MWh_{th} ab Importhafen und in Klammern als Prozentwert der durchschnittlichen Steinkohlepreise frei Grenze im Jahr 2012. Den Berechnungen zu Abbildung 8 (rechter Teil) liegt die Annahme zugrunde, dass Standorte im Binnenland im Jahresmittel maximal zu fünf Prozent per Bahn beliefert werden, wenn es zu einer Sperrung von Wasserstraßen kommt. Der Kostenvergleich zeigt, dass Kraftwerke mit Küstenstandort oder relativer Nähe zu Seehäfen der Nord- und Ostsee die geringsten



Investitionsentscheidungen zur optimalen Risikodiversifikation von Kraftwerksbetreibern

Kosten für den Brennstofftransport ausweisen, da außer den Entladekosten keine weiteren Kosten anfallen. Für die Kraftwerke mit einem Binnenstandort steigen die Kosten umso mehr, je weiter südlich sich die Kraftwerke befinden und je größer die Entfernung zur Rheinschiene ist. Hier sind mitunter signifikante Kostenunterschiede festzustellen. Je weiter sich der Standort im Landesinneren befindet, desto kleiner werden die einsetzbaren Schiffsgrößen und desto teurer wird folglich der Kohletransport. Erfolgt die Brennstoffversorgung alternativ mit der Bahn als Transportmittel, ist mit deutlich höheren Transportkosten zu rechen (vgl. Abbildung 8 linker Teil).



Abbildung 8: Regionale Transportkosten für Kesselkohle für ausgewählte Regionen ab Importhafen, Quellen: [6], eigene Darstellung auf Basis der Angaben in [10].

Attraktive Standorte aus Sicht der Brennstofftransportkosten beschränken sich daher entweder auf Küstenstandorte oder Standorte entlang der Rheinschiene.

Neben den Brennstofftransportkosten für Steinkohle wurde untersucht, ob Erdgaspreise standortabhängig sind und somit für einen Kraftwerksinvestor in der Portfolioanalyse zu berücksichtigen sind. Während in der Vergangenheit historische oder regionale Preisunterschiede für Erdgas zu beobachten waren, existieren diese durch das neue Entry-Exit-Marktmodell und die fortgeschrittene Integration der Marktgebiete kaum noch. Innerhalb eines Marktgebiets bestehen im Regelfall keine Standortunterschiede, so dass sich für einen Kraftwerksinvestor keine Anreize stellen, eventuelle Engpässe im Gasnetz oder eine Minimierung der Transportwege bei dem Standortkalkül zu berücksichtigen. Daraus folgt, dass durch das Preissystem der Gasnetzentgelte kaum Standortvor- bzw. -nachteile entstehen [6].

Die identifizierten Standortvorteile bei den Transportkosten für Steinkohle sind Gegenstand weiter Modellanalysen.



6 Wesentliche terminliche und inhaltliche Abweichungen zum Projektantrag

Mit der Bearbeitung des Projekts wurde verzögert begonnen. Die Laufzeit wurde deswegen bis Ende 2013 verlängert. Die geplante Erhebung von Daten zu zeitlich hoch aufgelösten unternehmensspezifischen Absatzprofilen ist nach aktuellem Kenntnisstand für die Modellentwicklung nicht erforderlich. Dieses Arbeitspaket war ursprünglich dafür vorgesehen, unternehmensspezifische Absatzprofile mithilfe regionaler Lastganglinien zu generieren, um Preiseffekte durch langfristige Lieferverträge berücksichtigen zu können. Für das Portfoliomodell können gleichermaßen Großhandelspreise verwendet werden, wie sie an der Strombörse gebildet werden. Obwohl das am Spot Markt gehandelte Volumen nur ca. 40 Prozent des gesamten Stromverbrauchs beträgt, hat dieser Preis wegen Arbitragechancen auch Signalwirkung für den Rest des Marktes, d.h. Erzeuger können ihren Strom alternativ auch auf dem Spotmarkt verkaufen. Sie würden also nicht weniger akzeptieren als den Spotmarktpreis (ggf. korrigiert um eine Risikoprämie).

7 Publikationen und Patente

7.1 Im Rahmen des Projektes entstandene Publikationen

 Gottschling, J.: (Anstehend) Portfolioauswahl in der Elektrizitätswirtschaft – Ein lineares Modell zur Auswahl effizienter Kraftwerksportfolios, 10. Fachtagung des VDI Optimierung in der Energiewirtschaft, Köln, November 2013.

Patente sind im Rahmen dieses KW21 Teilprojektes nicht entstanden.

7.2 Gemeinsame Publikationen zweier oder mehrerer KW21 Teilprojekte

Gemeinsame Publikationen mehrerer KW21-Teilprojekte sind im Rahmen dieses KW21 Teilprojektes nicht entstanden.

7.3 Weitere Publikationen

- [2] Awerbuch, S.: Market-based IRP: It's easy! Electricity Journal (1995), Vol. 8 (3), S. 50-67.
- [3] Awerbuch, S.: The surprising role of risk and discount rates in utility integrated resource planning. The Electricity Journal (1993), Vol. 6 (3), S. 20-33.
- [4] Awerbuch, S., Berger, M. und Haas, R.: Versorgungssicherheit und Diversifizierung der Energieversorgung in der EU - Mean-Variance Portofolioanalyse des Stromerzeugungsmix und Auswirkungen auf die Bedeutung erneuerbarere Energieträge. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 2/2003, S. 22-23.
- [5] Benz, E. ;Trück, S.: CO₂ Emission Allowances Trading in Europe Specifying a New Class of Assets, Problems and Perspectives in Management (2006), Vol. 4 (3), S. 30-40.



- [6] Consentec, Frontier Economics: Notwendigkeit und Ausgestaltung geeigneter Anreize für eine verbrauchsnahe und bedarfsgerechte Errichtung neuer Kraftwerke, Gutachten im Auftrag des Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), durchgeführt von Frontier Economics Limited und Consentec, London/Köln, November 2008.
- [7] Daskalakis ,G.; Psychoyios, D.; Markellos, R.: Modeling CO₂ emission allowance prices and derivatives: Evidence from the EEX, Athens, 2006, Herunterladbar: http://wcms.uzi.uni-halle.de/download.php?down=1477&elem=1040342
- [8] Farrell, J. L.: Portfolio Management. Theory and Application. New York: McGraw-Hill, 1997.
- [9] Gottschling, J., Sun, N., Voß, A.: Modell zur Portfolioauswahl in der Elektrizitätswirtschaft – Entwicklung eines Modells zur Bestimmung optimaler Erzeugungsportfolios zur Gewährleistung der langfristigen Versorgungssicherheit, Zwischenbericht zum KW21 II Projekt BWL 21E, September 2013.
- [10] Hobolm, J. et al.: Variantenvergleich Küste versus Binnenland, Ein volkswirtschaftlicher Vergleich der Kosten, Versorgungssicherheit und Umweltverträglichkeit von Kraftwerksstandorten, Berlin 2006.
- [11] Hodrick, R., Prescott, E.: Post-war U.S. business cycles: An empirical investigation, Discussion Paper No. 451, Department of Economics, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, PA, 1980.
- [12] International Energy Agency (IEA): World Energy Outlook 2012, OECD Publishing, 2012.
- [13] Markowitz, H.M.: Portfolio Selection. Journal of Finance (1952), Vol. 7 (1), S. 77-91.
- [14] Paolella, M.; Taschini, L.: An Econometric Analysis of Emission Trading Allowances, 2006, Herunterladbar: http://papers.ssrn.com/sol3/papers. cfm?abstract_id=947055.
- [15] Pindyck, R.: The Log-Run Evolution of Energy Prices. The Energy Journal (1999), Vol. 20 (2), S. 1-27.
- [16] Reich, J., Benesch, A.: Steinkohlekraftwerke: Konzepte und Faktoren der Standortauswahl, VGB Powertech 9/2007
- [17] Rockafellar, R.T., Uryasev, S.: Optimization of Conditional Value-at-Risk. The Journal of Risk (1999), Vol. 2 (3), S. 21-41.
- [18] Sun, N., Ellersdorfer, I., Swider, D.J.: Model-based long-term electricity generation system planning under uncertainty. Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Nanjing, China, April 2008.
- [19] Tobin, J.: Liquidity Preference as Behavior Towards Risk. The Review of economic studies (1958), Vol. 67, S. 65-86.
- [20] Triskatis (eh. Wagner), M.: CO₂-Emissionszertifikate Preismodellierung und Derivatebewertung, Universität Karlsruhe Dissertation 2007.



- [21] Wissel, S.; Fahl, U.; Blesl, M.; Voß, A.: Erzeugungskosten zur Bereitstellung elektrischer Energie von Kraftwerksoptionen in 2015, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart; IER Working Paper No. 7, Stuttgart, 2010.
- [22] Zenios. S. Practical Financial Optimization: Decision Making for Financial Engineers, Blackwell Publishing, Cambridge, 2008.

7.4 Im Rahmen des Projektes entstandene Patente

Patente sind im Rahmen dieses KW21 Teilprojektes nicht entstanden.

8 Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses

8.1 Studentische Mitarbeiter

- Simon Mai
- Martin Steurer

8.2 Studien- Semester- und Bachelorarbeiten

- Bachelor-Projektarbeit in kleinen Gruppen zum Thema: Identifikation und monetäre Bewertung von Standortkriterien bei Kraftwerksinvestitionen
 - · Simon Wollensak, Technologiemanagement
 - Sebastian Teichert, Technologiemanagement
 - Marten Kunath, Technologiemanagement
 - Fabian Grajer, Technologiemanagement
 - Markus Reutter, Technologiemanagement
 - Nicolas Bergengruen, Maschinenbau

8.3 Diplom- und Masterarbeiten

- Andreas Reiser (Technisch orientiertet BWL Uni Stuttgart, Diplomarbeit): Möglichkeiten der Regelung thermischer Kraftwerke mit besonderer Berücksichtigung der Anfahrkosten
- Melanie Dürr (Technisch orientiertet BWL Uni Stuttgart, Diplomarbeit): Vergleich von Prognosemodellen der Energieträgerpreise für Erdgas und Steinkohle
- Franziska Deutschmann (Wirtschaftsmathematik Uni Halle-Wittenberg, Masterarbeit): Forecasting Natural Gas and Coal Prices Using Multiple Time Series Analysis: A VECM Approach

8.4 Promotionen

Dipl. Ing. Johann Gottschling: (Laufend) Portfolioauswahl in der Elektrizitätswirtschaft



9 Forschungsprogramme des Bundes und der EU

9.1 Angaben, ob weitere Drittmittel zum Projektthema eingeworben wurden, insbesondere aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen des Bundes und der EU

Es wurden keine weiteren Drittmittel zum Projektthema eingeworben.

9.2 Geplante Antragsstellung bzw. künftige Förderung aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen von Bund, EU etc. sowie allgemeinen Förderprogrammen (z.B. DFG)

Es wurden keine Forschungsanträge zum Projektthema gestellt.

Arbeitskreis Energiewirtschaft

Projekt: BW L 22E

Entwicklung eines Modellansatzes zur integrierten Analyse von Erdgasbereitstellung, Erdgastransport und Erdgasverbrauch in Europa

Antragsteller:	Prof. DrIng. Alfred Voß
Institut/Lehrstuhl:	Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) Universität Stuttgart
Projektleiter:	DrIng. Markus Blesl
Mitarbeiter:	DiplIng. David Bruchof Monika Culka, M. Sc.
	Din eli, pol. Olich Falli Din -Wi -Ing. Tom Kober
	DiplKfm. Ralf Kuder, M. Sc.
	DiplIng. (FH) Steffen Wissel
Finanzierung:	Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg

1 Ausgangssituation

Komplexität und Vernetzung sowie eine immer stärkere internationale und globale Dimension sind Kennzeichen der heutigen gesellschaftlichen Entwicklung. Die Energieprobleme und die mit ihnen eng verknüpften Belastungen von Umwelt und Natur sowie die Gefahren einer Veränderung des Klimas sind angesichts einer wachsenden Weltbevölkerung zentrale Aspekte der globalen Problematik. Zusätzlich sind Schlagworte wie Europäische Integration, Energiepolitische Neuorientierung / Energiewende und Nachhaltige Entwicklung in diesem Zusammenhang von Bedeutung. In Bezug auf die Energieversorgung und deren Ausgestaltung im Hinblick auf Versorgungssicherheit, Wettbewerbsfähigkeit, Nach-



haltigkeit sowie Umwelt- und Klimaverträglichkeit wird dem Erdgas in diesem Zusammenhang eine weiter wachsende Bedeutung sowohl in Deutschland und Europa als auch weltweit zugeschrieben.

So wird etwa in der Studie "Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung" der Arbeitsgemeinschaft EWI, GWS und Prognos AG davon ausgegangen, dass im Jahr 2030 die Naturgase einen Anteil von 23,1 % (2445 PJ) am Primärenergieverbrauch in Deutschland aufweisen können gegenüber 21,6 % in 2008 (3070 PJ) (EWI et al. 2010). Für die Europäische Union (EU 27) gehen die Projektionen des "World Energy Outlook 2010" der Internationalen Energieagentur von einem Anteil des Erdgases am Primärenergieverbrauch in 2030 von bis zu 28,6 % (2008: 25,2 %) aus (IEA 2010).

Für eine derartige Ausweitung des Erdgasanteils am Energieverbrauch lassen sich einige fördernde Argumente anführen: Der Einsatz von Erdgas unterstützt mit Hilfe fortgeschrittener Technologien, wie z. B. Brennwertkesseln, Blockheizkraftwerken, Gasturbinen und GuD-Kraftwerken sowie Erdgasfahrzeugen, die sparsame Energieverwendung, die Ressourcenschonung und den Umweltschutz; die Erdgasreserven und -ressourcen reichen weit in dieses Jahrtausend hinein, darüber hinaus bieten Shale Gas und Erdgashydrate ein immenses Potenzial für die Zukunft; Erdgas hat von allen fossilen Brennstoffen bei Produktion, Transport, Speicherung und Verwendung die geringsten Auswirkungen auf unser Ökosystem (Umweltfreundlichkeit); die Struktur der Gasversorgung ist offen für andere gasförmige Energieversorgungssysteme, wie z. B. Biogas.

Hinsichtlich der Marktentwicklung beim Erdgas ist zu berücksichtigen, dass die Nutzung des Erdgases in den Staaten der EU 27 und insbesondere in Deutschland in den einzelnen Marktsegmenten auf eine unterschiedliche Ausgangssituation aufbaut. Während der Wärmemarkt heute bereits weitgehend für das Erdgas erschlossen ist, sind Zuwachspotenziale für das Erdgas vor allem in der Stromerzeugung und im Verkehr vorhanden.

Die Tendenz eines verstärkten Erdgaseinsatzes in der Stromerzeugung wird in Deutschland durch die energie- und umweltpolitischen Vorgaben zur Kraft-Wärme-Kopplung und zum Klimaschutz weiter gestärkt. Auch die Liberalisierung der europäischen Gas- und Strommärkte wird als Argument genannt, dass Erdgas aufgrund der geringen Kapitalintensität der Kraftwerke in der Stromerzeugung große Chancen hat, wie die Erfahrungen in Großbritannien zeigen. Hier wurde im Zuge der Liberalisierung der Gaseinsatz in der Stromerzeugung wesentlich erhöht.

2 Projektziele

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, mittels einer integrierten modellgestützten Betrachtung zu analysieren, welche Perspektiven die Stromerzeugung aus Erdgas und die Nutzung von Erdgas als Energieträger im Rahmen der europäischen Erdgasversorgung aufweist. Das Einsatzpotenzial von Erdgas wird hinsichtlich der Aspekte Wirtschaftlichkeit, Umwelt- und Klimaschutz sowie Versorgungssicherheit bewertet. Darauf aufbauend werden Anforderungen hergeleitet, welche ökonomischen, technischen und ökologischen Parameter Techniken zur Stromerzeugung aus Erdgas und Nutzung von Erdgas als Primärenergieträger zukünftig aufweisen sollten.

Entsprechend wurden die folgenden vier Arbeitsschwerpunkte im Rahmen des Vorhabens bearbeitet:


- Analyse der Erdgasabsatzmärkte;
- Analyse des Erdgasangebotes in Europa;
- Erweiterung eines Energiesystemmodells hinsichtlich Erdgasabsatzmärkten und Erdgasangebot;
- · Integrierte Gesamtanalyse des Erdgaseinsatzes in Deutschland und in Europa;

Um die Vielschichtigkeit der Aspekte beim Erdgasangebot und bei der Erdgasnachfrage erfassen zu können, erfolgt im Rahmen des Forschungsvorhabens eine integrierte, modellgestützte, gesamtsystemare Betrachtung der europäischen Erdgasversorgung. Hierfür wird auf einem bestehenden Modellansatz TIMES aufgebaut, für den der Modelldatensatz TIMES PanEU weiterentwickelt wird. Es ist ein 30 Regionen umfassendes Energiesystemmodell (Blesl et al. 2008), (Blesl et al. 2009), (Blesl et al. 2010), (Blesl et al. 2011a), (Blesl et al. 2011b), welches alle Staaten der EU 27 sowie die Schweiz, Norwegen und Island beinhaltet.

3 Vernetzung

3.1 Vernetzung innerhalb KW21

Im Rahmen der regelmäßig statt gefundenen Projektreffen innerhalb des Arbeitskreises "Energiewirtschaft" wurde eine enge Abstimmung der Szenarienannahmen hinsichtlich der unterstellten Energieträgerpreisentwicklung, dem Mindesteinsatz bzw. dem maximalen Potenzial an erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung und der Annahmen hinsichtlich der technischen und ökonomischen Charakterisierung neuer Kraftwerke vorgenommen.

Die Ergebnisse des Projektes B1E "Energiespeicher", die eine technisch/ökonomische Charakterisierung der Speicheroptionen beschreiben, wurden ebenso wie die Ergebnisse der beiden Projekte B2E "Elektrostraßenfahrzeuge zum Lastmanagement" und BY 3E "Lastgangprogosen" mit den erzielten Ergebnissen des vorliegenden Forschungsvorhabens verglichen.

Stärkere Verbindungen gab es zu den Projekten BW L 21E bzw. BW W 21E "Modell zur Portfolioauswahl in der Elektrizitätswirtschaft". Die hier gewonnenen Erkenntnisse bzgl. der Portfolioauswahl wurden genutzt, um eventuelle Modellunzulänglichkeiten von TIMES PanEU aufgrund der begrenzten zeitlichen Auflösung auszugleichen.

3.2 Vernetzung außerhalb KW21

Eine Vernetzung außerhalb von KW21 wurde mit dem Kolleg "Energy Scenarios - Construction, Assessment, and Impact" der Helmholtz-Gemeinschaft (HGF) initiiert. Im Rahmen von drei Workshops des HGF-Kollegs wurden das KW21 Projekt und der methodische Ansatz präsentiert und diskutiert. Die Anregungen aus den Workshops wurden in die weitere Bearbeitung des KW21 Projektes aufgenommen. Im Gegenzug gaben die Untersuchungen aus dem KW21 Projekt den Teilnehmern des HGF-Kollegs Erkenntnisse zur Entwicklung und Nutzung von Energieszenarien am Beispiel der Erdgaswirtschaft.



4 Vorgehensweise und Methodik

Um modellgestützte Aussagen über die Perspektiven des Erdgaseinsatzes in europäischem Kontext, insbesondere für die Stromerzeugung, treffen zu können, wurde einerseits das Energiesystemmodell TIMES PanEU hinsichtlich der Abbildung des Erdgasmarktes detailliert. Andererseits wurde eine Szenarienanalyse zum Erdgaseinsatz und den Erdgasnutzungstechnologien durchgeführt.

Das Pan-Europäische TIMES Energiesystemmodell (kurz TIMES PanEU) baut auf dem Modellgenerator TIMES (The Integrated Markal Efom System) auf. Die Zielfunktion des Modells ist eine zeitintegrale Minimierung der gesamten diskontierten Systemkosten für den Zeithorizont 2000 bis 2050. Dabei ist im Modell ein vollständiger Wettbewerb zwischen verschiedenen Technologien bzw. Energieumwandlungspfaden unterstellt. Als Energieversorgung und -nachfrage beteiligten Sektoren, wie beispielsweise den Rohstoffbereitstellungssektor, die öffentliche und industrielle Strom- und Wärmeerzeugung, die Industrie, den Gewerbe-, Handel-, Dienstleistungssektor, die Haushalte und den Transportsektor. Sowohl die Treibhausgasemissionen (CO₂, CH₄, N₂O) als auch die wichtigsten Schadstoffemissionen (CO, NO_x, SO₂, NMVOC, PM₁₀, PM_{2,5}) sind in TIMES PanEU erfasst.

Bei der Strom- und Wärmeerzeugung in Kraftwerken, KWK-Anlagen und Heizwerken wird zwischen öffentlicher Erzeugung und industrieller Eigenproduktion unterschieden. Das Modell umfasst drei verschiedene Elektrizitätsniveaus (Höchstspannung, Mittelspannung, Niedrigspannung) und zwei unabhängige Wärmenetze (Fernwärme, Nahwärme). Durch seine regionale Auflösung erlaubt TIMES PanEU die Berücksichtigung länderspezifischer Besonderheiten, wie z. B. unterschiedliche Kraftwerksstrukturen des Bestandes oder regional verschiedene Ausbaupotenziale für erneuerbare Energien. Im Modell ist ein interregionaler Stromhandel implementiert, so dass Elektrizitätsexporte und -importe unter Berücksichtigung bestehender Kuppelleitungskapazitäten endogen im Modell berechnet werden.

Im Verkehrssektor sind die vier Bereiche Straßenverkehr, Schienenverkehr, Schifffahrt und Luftfahrt abgebildet. Der Straßenverkehr enthält insgesamt fünf Nachfragekategorien für den Personenverkehr (PKW Kurzstrecke, PKW Langstrecke, Linienbusse, Reisebusse, Krafträder) und eine für den Gütertransport (LKW). Der Schienenverkehr umfasst die drei Kategorien Schienenpersonenverkehr nah und fern sowie Schienengüterverkehr. Die Verkehrsmodi Schifffahrt und Luftfahrt werden jeweils durch einen Technologie unspezifischen allgemeinen Prozess abgebildet, bei dem die Entwicklung der Verkehrsnachfrage durch die Entwicklung der Endenergienachfrage repräsentiert wird.

Der Haushaltssektor umfasst elf Nachfragekategorien (Raumwärme, Raumklimatisierung, Warmwasser, Kochgeräte, Beleuchtung, Kühlschränke, Waschmaschinen, Wäschetrockner, Spülmaschinen, sonstige Elektrogeräte, sonstiger Energieverbrauch), wovon die ersten drei Kategorien weiter differenziert werden nach Gebäudetypen (Einfamilienhäuser in städtischen und ländlichen Gebieten sowie Mehrfamilienhäuser, jeweils unterteilt in Gebäudebestand und Neugebäude).

Entwicklung eines Modellansatzes zur integrierten Analyse von Erdgasbereitstellung, -transport und -verbrauch in Europa



Der Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) wird durch ein ähnlich strukturiertes Referenzenergiesystem (RES) abgebildet und umfasst neun Nachfragekategorien (Raumwärme, Raumklimatisierung, Warmwasser, Kochgeräte, Kühlschränke, Beleuchtung, öffentliche Straßenbeleuchtung, sonstige Elektrogeräte, sonstiger Energieverbrauch). Die ersten drei Kategorien werden weiter untergliedert nach Gebäudetypen (groß/klein). Der Sektor Landwirtschaft wird durch einen allgemeinen Prozess beschrieben mit einem Mix aus mehreren Energieträgern als Input und einer aggregierten Nutzenergienachfrage als Output.

In der Industrie wird zwischen energieintensiver Industrie und sonstiger Industrie unterschieden. Während für die energieintensive Industrie ein prozessorientiertes RES implementiert wurde, wird die sonstige Industrie durch eine einheitliche Struktur bestehend aus fünf Energieanwendungen (Dampf, Prozesswärme, Maschinenantrieb, elektrochemische Anwendungen, Sonstige) repräsentiert. In der energieintensiven Industrie wird nach mehreren Branchen differenziert (Stahl, Zement, Aluminium usw.).

Im Rohstoffbereitstellungssektor werden alle Primärenergieressourcen (Rohöl, Erdgas, Steinkohle, Braunkohle) durch Angebotskurven mit mehreren Kostenstufen modelliert. Dabei werden drei verschiedene Kategorien unterschieden: entdeckte Reserven (oder erschlossene Quellen), Reservenwachstum (oder Sekundär- und Tertiärförderung) und Neuentdeckungen. Zusätzlich werden sieben verschiedene Bioenergieträger berücksichtigt: Alt- und Restholz, Biogas, Haushaltsmüll, Industriemüll, sowie zuckerhaltige, stärkehaltige und lignocellulosehaltige Energiepflanzen.

Um in TIMES PanEU die Erdgasbereitstellung verbessert abzubilden, wurden länderspezifisch das Erdgasangebot in Form von Reserven und Ressourcen, die Lieferoptionen durch Anschlüsse an das Pipelinenetz bzw. alternativ durch LNG-Terminals in das Modell integriert. Um die Erdgasflüsse innerhalb der EU zu erfassen, wurden zwischen den Ländern das Erdgastransportnetz in Form der bestehenden Austauschkapazitäten und -mengen inkl. möglicher Ausbauoptionen modelliert (Abbildung 1). Im Weiteren wurde im Modell durch die Einführung von Druckstufen für das Erdgasnetz und die Abbildung von Speicherkapazitäten die Modellierung von nach Verbrauchergruppen differenzierter Erdgaspreise ermöglicht. Die für die Modellerweiterung notwendige Datenbasis wurde anhand ausführlicher Literaturrecherchen und Plausibilitätsanalysen ermittelt.





Abbildung 1: Bestehende und geplante Erdgastransportpipelines in Europa (CAPGEMINI 2011)

Mit dem erweiterten Modellansatz wurden unterschiedliche Szenarien gerechnet, um die Auswirkungen von Szenarienannahmen auf die Entwicklung der nachgefragten Erdgasmengen zu analysieren. Im Rahmen der Szenarienanalyse wurden die für den Erdgasverbrauch in Europa und in Deutschland relevanten Einflussgrößen (Szenariodimensionen) in einer Sensitivitätsanalyse ceteris paribus variiert. Die betrachteten Szenariodimensionen sind:

- · Treibhausgasminderungsziele auf europäischer Ebene
- Erneuerbaren Energien Quoten
- Mögliche technologische Entwicklungen (Investitionskostenvariation)
- Energieträgerpreise
- CO₂-Preise

Als Szenarien wurden hierbei u. a. die Fortführung der derzeitigen Energie- und Klimapolitik in Deutschland mit einer auf den Emissionshandel beschränkten CO₂-Minderungsvorgabe (Szenario ETS), einer Ausweitung der Klimaschutzziele und dessen Variation auf alle Sektoren (Szenarien THG), der Einfluss verschiedener Erdgaspreise im Falle eines Sektor übergreifenden Reduktionsziels (Szenarien Erdgaspreis) und die Mindestvorgabe hinsichtlich des Anteils erneuerbaren Energien am Bruttoendenergieverbrauch (Szenario BEEV) berechnet.

Durch die Verwendung des Energiesystemmodells TIMES PanEU können Aussagen über den Einfluss der verschiedenen Variablen nicht nur für einen Teil des Energiesystems, die Erdgaswirtschaft, sondern für das im Modell abgebildete Energiesystem insgesamt getroffen werden. Aus wissenschaftlicher Sicht ergibt sich somit ein umfassenderes Bild der Potenziale des Erdgaseinsatzes mit der Möglichkeit, Substitutionseffekte zu analysieren.



5 Projektergebnisse und Ausblick

Im Rahmen des Projektes wurden die Entwicklung des Gasmarktes im Kontext verschiedener klimapolitischer Ziele, der Anteile der regenerativen Energien, von Gaspreisen und CO₂-Preisen sowie der Investitionskosten ausgewählter Technologien analysiert. Die Szenarienergebnisse des Primärenergieverbrauchs an Erdgas und des Brennstoffeinsatz von Erdgas in der Strom- und Wärmeerzeugung für das Jahr 2030 im Vergleich zu 2012 sind beispielhaft in Abbildung 2 dargestellt.

Im Szenario, in welchem die derzeitige Energie- und Klimapolitik in Deutschland bis 2030 fortgesetzt wird (vgl. Spalte ETS in Abbildung 2), sinkt der Primärenergieverbrauch an Erdgas im Vergleich zu 2012 um 935 PJ. Dies ist zum Teil auf die durch die Energieeinsparverordnung induzierte Reduktion der Raumwärmenachfrage in den Sektoren Haushalte und GHD (Gewerbe, Handel, Dienstleistungen) zurückzuführen. Durch die im Szenario unterstellte verstärkte Nutzung der erneuerbaren Energien in der Stromerzeugung, einem stärkeren prozentualen Anstieg der Erdgaspreise – im Vergleich zu den Kohlepreisen – sowie aufgrund der Effizienzsteigerung des Gaskraftwerkparks nimmt auch der Brennstoffeinsatz an Erdgas zur Strom- und Wärmeerzeugung um nahezu 300 PJ ab.

Im Fall der Szenarien mit einem Sektor übergreifenden Klimaschutzziel, das für das Jahr 2030 gegenüber dem Jahr 1990 in einem Bereich zwischen 30 % und -50 % variiert wird (bzw. zwischen -50 % und -90 % im Jahr 2050), geht der Primärenergieverbrauch an Erdgas weiter zurück (vgl. Spalte THG in Abbildung 2). Dies ist zum Teil dadurch begründet, dass durch die Ausweitung des Emissionsminderungsziels auf alle Sektoren die Wettbewerbsfähigkeit von Erdgas im Wärmemarkt im Vergleich zu Elektroanwendungen und Effizienzsteigerungen weiter zurückgeht. Hingegen nimmt der Brennstoffeinsatz von Erdgas in der Strom- und Wärmeerzeugung leicht zu, da die Wärmeerzeugung über KWK-Anlagen im Wärmemarkt konkurrenzfähiger wird.



Abbildung 2: Erdgasverbrauch in Deutschland im Jahr 2030 im Szenarienvergleich gegenüber 2012



Die zeitliche Entwicklung des Erdgaseinsatzes in der EU27 in Abhängigkeit vom Klimaschutzziel zeigt Abbildung 3. Der bei ambitionierten Klimaschutzzielen (-90 % in 2050 gegen**ü**ber 1990) rückläufige Anteil von Erdgas am Primärenergieverbrauch der EU-27 ist durch die mit dem Einsatz des Energieträgers verbundenen Emissionen begründet. Bei starken Treibhausgasreduktionszielen trägt Erdgas ohne Carbon Capture and Storage (CCS) nicht zur Erreichung der Ziele bei.

Wird das Treibhausgas-(THG-)Minderungsziel in 2030 auf eine Reduktion mit -45 % gegenüber 1990 festgeschrieben und werden gleichzeitig die Erdgaspreise im Vergleich zum Basispreis in Höhe von 7,9 €/PJ in einer Bandbreite zwischen 4,7 €/PJ und 9,5 €/PJ variiert (vgl. Spalte Erdgaspreise in Abbildung 2), so steigt der Primärenergieverbrauch an Erdgas bei niedrigen Gaspreisen an. Dies ist dadurch begründet, dass Erdgas im Bereich der Raumwärmeerzeugung damit vermehrt Heizöl substituieren kann und energetische Sanierungsmaßnahmen am Gebäudebestand im geringeren Umfang wirtschaftlich sind und damit durchgeführt werden. Der Brennstoffeinsatz von Erdgas zur Strom- und Wärmeerzeugung variiert in Abhängigkeit des Erdgaspreises kaum, da zum einen der unterstellte Ausbau der erneuerbaren Energien in der Stromerzeugung und zum anderen die in den vergangen Jahren geschaffenen große Kapazitäten an Kohlenkraftwerken, den Erdgaseinsatz wirtschaftlich einschränken.



Abbildung 3: Erdgaseinsatz in der EU27 bei niedrigen Klimaschutzzielen (50% Reduktion bis 2050) und ambitionierten Klimaschutzzielen (90% Reduktion bis 2050)

Das europäische Energie- und Klimapakt hat das Ziel, im Jahr 2020 zumindest einen Anteil von 20 % am Bruttoendenergieverbrauch über erneuerbare Energien zu decken. Wird dieser Zielwert bis 2030 auf 45 % fortgeschrieben, so wird sowohl im Bereich der Wärmenachfrage als auch der Stromerzeugung der Erdgaseinsatz nochmals weiter reduziert (vgl. Spalte BEEV in Abbildung 2).



Die im Rahmen des KW21 Projektes durchgeführten Modellanalysen zeigen, dass sowohl der Primärenergieverbrauch an Erdgas insgesamt als auch der Brennstoffeinsatz an Erdgas zur Strom- und Wärmeerzeugung gegenüber 2012 sowohl mittelfristig (2030) als auch langfristig (2050) abnehmen werden. Dies gilt sowohl für Deutschland als auch für Europa. Die Hauptgründe hierfür liegen zum einen an dem Rückgang des Energieverbrauchs zur Deckung der Raumwärmenachfrage und zum anderen an den politischen Zielvorgaben hinsichtlich des Ausbaus der erneuerbaren Energien zur Strombereitstellung.

Das neu entwickelte Modellinstrumentarium wurde im Zusammenhang mit Fragen zur zukünftigen Bedeutung des Erdgases in der deutschen und europäischen Energieversorgung bereits weiter genutzt und im Projekt "Energie- und gesamtwirtschaftliche Auswirkungen veränderter Rahmenbedingungen auf die Nutzung von Erdgas in Deutschland" im Auftrag des Zentrums für Energieforschung Stuttgart (ZfES) eingesetzt. Zudem ist geplant, das neue Modell im Rahmen des Programms "Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg" (KLIMOPASS) der baden-württembergischen Landesregierung für das Teilvorhaben "Energiewirtschaftliche Effekte des Klimawandels in Baden-Württemberg – Auswirkungen auf Energienachfrage und -angebot" zu nutzen, um die erzielten Fortschritte in der Modellierung weiter anzuwenden und zu vertiefen.

6 Wesentliche terminliche und inhaltliche Abweichungen zum Projektantrag

Das Projekt hatte eine Laufzeit vom 1. Januar 2009 bis zum 30. April 2013. In diesem Zeitraum wurden die Arbeiten durchgeführt und erfolgreich abgeschlossen.

7 Publikationen und Patente

7.1 Im Rahmen des Projektes entstandene Publikationen

7.1.1 Begutachtete Publikationen

[1] M. Blesl, T. Kober, D. Bruchof, R. Kuder (2010): Effects of climate and energy policy related measures and targets on the future structure of the European energy system in 2020 and beyond, Energy Policy 38 (2010) 6278–6292

7.1.2 Nicht-begutachtete Publikationen

- [2] M. Blesl (2010): Natural gas supply for Europe: an analysis with TIAM-IER, Vortrag gehalten anlässlich des Workshops "Joint TERI-ETSAP Workshop" in New Dehli am 22. Januar 2010, veranstaltet von ETSAP – Energy Technology Systems Analysis Program
- [3] M. Culka, U. Fahl, A. Voß (2013): Statistical analysis of explaining variables on the primary energy consumption of Natural Gas in Germany in 2030, eingereicht bei: The Energy Journal, International Association for Energy Economics



7.2 Gemeinsame Publikationen zweier oder mehrere KW21 Teilprojekte

Keine

7.3 Weitere Publikationen

- [4] Blesl et al. 2008; M. Blesl, T. Kober, D. Bruchof, R. Kuder: Beitrag von technologischen und strukturellen Veränderungen im Energiesystem der EU27 zur Erreichung ambitionierter Klimaschutzziele; in: Zeitschrift für Energiewirtschaft (ZfE), Vol. 32 (2008), Heft 4, p. 219 – 229
- [5] Blesl et al. 2009; M. Blesl, C. Cosmi, V. Cuomo, S. Kypreos, M. Salvia, D. van Regemorter: Final report on the integrated Pan-European Model. NEEDS New Energy Externalities Developments for Sustainability Integrated Project, Technical Report n° T5.20 – RS 2a, Brussels, 2009
- [6] Blesl et al. 2010; M. Blesl, T. Kober, D. Bruchof, R. Kuder: Effects of climate and energy policy related measures and targets on the future structure of the European energy system in 2020 and beyond, Energy Policy 38 (2010) 6278– 6292
- [7] Blesl et al. 2011a; M. Blesl, D. Bruchof, U. Fahl, T. Kober, R. Kuder, B. Götz, A. Voß: Integrierte Szenarioanalysen zu Energie- und Klimaschutzstrategien in Deutschland in einem Post-Kyoto-Regime; Forschungsbericht des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Band 106, Februar 2011
- [8] Blesl et al. 2011b; M. Blesl, T. Kober, R. Kuder, D. Bruchof: Implications of different climate protection regimes for the EU27 and its member states through 2050, Climate Policy, DOI: 10.1080/14693062.2011.637815
- [9] CAPGEMINI 2011: European Energy Markets Observatory, Nov 2011, http://www.capgemini.com/m/en/doc/EEMO11_CompleteReport.pdf
- [10] EWI et al. 2010; M. Schlesinger, D. Lindenberger, C. Lutz: Energieszenarien für das Energiekonzept der Bundesregierung, Studie für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, August 2010
- [11] IEA 2010; International Energy Agency: World Energy Outlook 2010, Paris 2010
- [12] Marin et al. 2009; J. M. Marin, C. Velasco, J. Garcia-Verdugo, G. Escribano, R. Mahia, R. De Arce: Quantification of socioeconomic risk proposal for an index of security of supply, Technical Note 4.5-1 and 4.5-2 REACCESS Project, EC-FP7
- [13] REACCESS 2011; B. Munoz Delgado: Energy security indices in Europe. 2011, http://www.eforenergy.org/docactividades/22/BMunoz.pdf
- [14] Scheepers et al. 2007; M. Scheepers, A. Seebregts : EU Standards for Energy Security of Supply. 2006. http://www.ecn.nl/docs/library/report/2006/c06039.pdf

7.4 Im Rahmen des Projektes entstandene Patente

Keine

8 Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses

8.1 Studentische Mitarbeiter

Beier, Michael	Datenrechere Erdgasangebot und -absatzmärkte
Broydo, Michael	Analyse des Wärmemarktes
Guitu, Ana	Analyse von KWK-Anlagen
Leinweber, Ina	Datenrechere Erdgasangebot und -absatzmärkte
Salomatina, Iryna	Analyse der Gasverwendung

8.2 Studien-, Semester- und Bachelorarbeiten

Mona Mutz:	Wirtschaftlicher Einsatz von Mikrogasturbinen bei hohen Prozesstemperaturen, September 2011
Robin Hoffmann:	Quantitative Methoden zur Bestimmung der Versorgungs- sicherheit in der Erdgaswirtschaft, Oktober 2012

8.3 Diplom- und Masterarbeiten

Ina Leinweber: Erdgasversorgung Europa – Analyse der Versorgungssicherheit und -risiken und der Preisbildung des Europäischen Erdgasmarktes

8.4 Promotionen

Promotionen sind im Rahmen des Teilprojektes nicht entstanden.

9 Forschungsprogramme des Bundes und der EU

9.1 Angaben, ob weitere Drittmittel zum Projektthema eingeworben wurden, insbesondere aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen des Bundes und der EU

EU – FP7	REACCESS – Risk of Energy Availability: Common Corridors for Europe Supply Security
EU – FP7	ATEsT – Analysing Transition Planning and Systemic Energy Planning Tools for the implementation of the Energy Technology Information System
ZfES	Energie- und gesamtwirtschaftliche Auswirkungen veränderter Rahmenbedingungen auf die Nutzung von Erdgas in Deutschland, Zentrum für Energieforschung Stuttgart
EnBW AG	Analyse des Wärmemarktes inkl. Kälte und Klimatisierung in Deutschland und Baden-Württemberg



9.2 Geplante Antragstellung bzw. künftige Förderung aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen von Bund, EU etc. sowie allgemeinen Förderprogrammen

Es ist keine weitere Antragsstellung zu diesem Thema geplant.



Arbeitskreis Energiewirtschaft

Projekt: BW W 22E

Perspektiven der Stromerzeugung aus Erdgas im Rahmen der europäischen Erdgasversorgung

Antragsteller:	Prof. DrIng. Alfred Voß
Institut/Lehrstuhl:	Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) Universität Stuttgart
Projektleiter:	DrIng. Markus Blesl
Mitarbeiter:	DiplIng. David Bruchof Monika Culka, M. Sc. Dr. rer. pol. Ulrich Fahl DiplWiIng. Tom Kober DiplKfm. Ralf Kuder, M. Sc. DiplIng. (FH) Steffen Wissel
Finanzierung:	EnBW Energie Baden-Württemberg AG E.ON Energie AG

1 Ausgangssituation

Komplexität und Vernetzung sowie eine immer stärkere internationale und globale Dimension sind Kennzeichen der heutigen Entwicklung. Die Energieprobleme und die mit ihnen eng verknüpften Belastungen von Umwelt und Natur sowie die Gefahren einer Veränderung des Klimas sind angesichts einer wachsenden Weltbevölkerung zentrale Aspekte der globalen Problematik. Zusätzlich sind Schlagworte wie Europäische Integration, Energiepolitische Neuorientierung und Nachhaltige Entwicklung in diesem Zusammenhang von Bedeutung. In Bezug auf die Energieversorgung und deren Ausgestaltung im Hinblick auf Versorgungssicherheit, Wettbewerbsfähigkeit, Nachhaltigkeit sowie Umwelt- und Klimaverträglichkeit, wird dem Energieträger Erdgas in diesem Zusammenhang eine weiter wachsende Bedeutung sowohl in Deutschland und Europa als auch weltweit zugeschrieben.



So wird etwa in der Studie "Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung" der Arbeitsgemeinschaft EWI, GWS und Prognos AG /EWI et al. 2010/ davon ausgegangen, dass im Jahr 2030 die Naturgase einen Anteil von 23,1 % (2445 PJ) gegenüber 21,6 % in 2008 (3070 PJ) am Primärenergieverbrauch in Deutschland aufweisen können. Für die Europäische Union (EU 27) gehen die Projektionen des "World Energy Outlook 2010" /IEA 2010/ von einem Anteil des Erdgases am Primärenergieverbrauch in 2030 von bis zu 28,6 % (2008: 25,2 %) aus.

Für eine derartige Ausweitung des Erdgasanteils am Energieverbrauch lassen sich einige fördernde Argumente anführen: Der Einsatz von Erdgas unterstützt mit Hilfe fortgeschrittener Technologien, wie z. B. Brennwertkesseln, Blockheizkraftwerken, Gasturbinen und GuD-Kraftwerken sowie Erdgasfahrzeugen, die sparsame Energieverwendung, die Ressourcenschonung und den Umweltschutz. Zudem reichen die Erdgasreserven und -ressourcen weit in dieses Jahrtausend hinein und darüber hinaus bieten Shale gas und Erdgashydrate ein immenses Potenzial für die Zukunft. Weiterhin hat Erdgas von allen fossilen Brennstoffen bei Produktion, Transport, Speicherung und Verwendung die geringsten Auswirkungen auf unser Ökosystem (Umweltfreundlichkeit) und die Struktur der Gasversorgung ist offen für andere gasförmige Energieversorgungssysteme, wie z. B. Biogas.

Hinsichtlich der Marktentwicklung bei Erdgas ist zu berücksichtigen, dass die Nutzung des Erdgases in den Staaten der EU 27 und insbesondere in Deutschland in den einzelnen Marktsegmenten auf eine unterschiedliche Ausgangssituation aufbaut. Während der Wärmemarkt heute bereits weitgehend erschlossen ist, sind Zuwachspotenziale für Erdgas vor allem in der Stromerzeugung und im Verkehr vorhanden.

Die Tendenz eines verstärkten Erdgaseinsatzes in der Stromerzeugung wird in Deutschland durch die energie- und umweltpolitischen Vorgaben zur Kraft-Wärme-Kopplung und zum Klimaschutz weiter gestärkt. Auch die Liberalisierung der europäischen Gas- und Strommärkte wird als Argument genannt, dass Erdgas aufgrund der geringen Kapitalintensität der Kraftwerke in der Stromerzeugung große Chancen hat, wie die Erfahrungen in Großbritannien zeigen. Hier wurde im Zuge der Liberalisierung der Gaseinsatz in der Stromerzeugung wesentlich erhöht.

Die Situation der Gasversorgung im Februar 2012 in Deutschland, insbesondere in Süddeutschland, hat jedoch auch gezeigt, dass eine Versorgungszuverlässigkeit bzw. eine Versorgungssicherheit beim Erdgas nicht automatisch für alle Zeiten gesichert ist, so dass Aspekte der Versorgungssicherheit in die Bewertung der zukünftigen Rolle von Erdgas mit einfließen sollten.

Um die Vielschichtigkeit der Aspekte beim Erdgasangebot und bei der Erdgasnachfrage erfassen zu können, erfolgt im Rahmen des Forschungsvorhabens eine integrierte, modellgestützte, gesamtsystemare Betrachtung der Versorgungssicherheit der europäischen Erdgasversorgung. Hierfür wird auf dem bestehenden Modellansatz TIMES aufgebaut, für den der Modelldatensatz TIMES PanEU weiterentwickelt wird.

Das Pan-Europäische TIMES Energiesystemmodell (kurz TIMES PanEU) ist ein 30 Regionen umfassendes Energiesystemmodell /Blesl et al. 2008b/, /Blesl et al. 2009/, /Blesl et al. 2010/, /Blesl et al. 2011a/, /Blesl et al. 2011b/, welches alle Staaten der EU 27 sowie die Schweiz, Norwegen und Island beinhaltet. Das Modell baut auf dem Modellgenerator TIMES (The Integrated Markal Efom System) auf. Die Zielfunktion des Modells ist eine



zeitintegrale Minimierung der gesamten diskontierten Systemkosten für den Zeithorizont 2000 bis 2050. Dabei ist im Modell ein vollständiger Wettbewerb zwischen verschiedenen Technologien bzw. Energieumwandlungspfaden unterstellt. Als Energiesystemmodell enthält TIMES PanEU auf einzelstaatlicher Ebene alle an der Energieversorgung und -nachfrage beteiligten Sektoren, wie beispielsweise den Rohstoffbereitstellungssektor, die öffentliche und industrielle Strom- und Wärmeerzeugung, die Industrie, den Gewerbe-, Handel-, Dienstleistungs-(GHD-)Sektor, die Haushalte und den Transportsektor. Sowohl die Treibhausgasemissionen (CO₂, CH4, N₂O) als auch die wichtigsten Schadstoffemissionen (CO, NO₄, SO₂, NMVOC, PM10, PM2,5) sind in TIMES PanEU erfasst.

2 Projektziele

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, mittels einer integrierten, modellgestützten Betrachtung zu analysieren, welche Perspektiven die Stromerzeugung aus Erdgas und die Nutzung von Erdgas als Energieträger im Rahmen der europäischen Erdgasversorgung aufweist. Das Potenzial wird hinsichtlich der Aspekte Wirtschaftlichkeit, Umwelt- und Klimaschutz sowie Versorgungssicherheit bewertet. Darauf aufbauend werden Anforderungen hergeleitet, welche ökonomischen, technischen und ökologischen Parameter Techniken zur Stromerzeugung aus Erdgas und zur Nutzung von Erdgas als Primärenergieträger zukünftig aufweisen sollten. Entsprechend werden die folgenden drei Arbeitsschwerpunkte im Rahmen des Vorhabens bearbeitet:

- Begriffsklärung und Modellierung von Versorgungssicherheit;
- Systemvergleich für Erdgasnutzungstechnologien;
- · Integrierte Gesamtanalyse des Erdgaseinsatzes in Deutschland und in Europa;

3 Vernetzung

3.1 Vernetzung innerhalb KW21

Im Rahmen der regelmäßig statt gefundenen Projektreffen innerhalb des Arbeitskreises "Energiewirtschaft" wurde eine enge Abstimmung der Szenarienannahmen hinsichtlich der unterstellten Energieträgerpreisentwicklung, dem Mindesteinsatz bzw. dem maximalen Potenzial an erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung und der Annahmen hinsichtlich der technischen und ökonomischen Charakterisierung neuer Kraftwerke vorgenommen.

Die Ergebnisse des Projektes BY 1E "Energiespeicher", die eine technisch/ökonomische Charakterisierung der Speicheroptionen beschreiben, wurden ebenso wie die Ergebnisse der beiden Projekte BY 2E "Elektrostraßenfahrzeuge zum Lastmanagement" und BY 3E "Lastgangprogosen" mit den erzielten Ergebnissen des vorliegenden Forschungsvorhabens verglichen.

Stärkere Verbindungen gab es zu den Projekten BW L 21E bzw. BW W 21E "Modell zur Portfolioauswahl in der Elektrizitätswirtschaft". Die hier gewonnenen Erkenntnisse bzgl. der Portfolioauswahl wurden genutzt, um eventuelle Modellunzulänglichkeiten von TIMES PanEU aufgrund der begrenzten zeitlichen Auflösung auszugleichen.



3.2 Vernetzung außerhalb KW21

Eine Vernetzung außerhalb von KW21 wurde mit dem Kolleg "Energy Scenarios - Construction, Assessment, and Impact" der Helmholtz-Gemeinschaft (HGF) initiiert. Im Rahmen von drei Workshops des HGF-Kollegs wurden das KW21 Projekt und der methodische Ansatz präsentiert und diskutiert. Die Anregungen aus den Workshops wurden in die weitere Bearbeitung des KW21 Projektes aufgenommen. Im Gegenzug gaben die Untersuchungen aus dem KW21 Projekt den Teilnehmern des HGF-Kollegs Erkenntnisse zur Entwicklung und Nutzung von Energieszenarien am Beispiel der Erdgaswirtschaft.

4 Vorgehensweise und Methodik

Es gibt mehrere, umfassende Definitionen von Versorgungssicherheit und Versorgungszuverlässigkeit. So definiert das United Nations Development Programme (UNDP) die Versorgungssicherheit als "Energy security is the continous availability of energy in varied forms, in sufficient quantities and at affordable prices". Deutlich wird, dass drei Aspekte von Relevanz sind: Ausreichendes Angebot, Liefersicherheit und Bezahlbarkeit (Abbildung 1). Diese Aspekte sind für alle Wertschöpfungsstufen (Versorgung, Transport, Nachfrage) und für unterschiedliche Zeiträume (kurzfristig (Stunden bis Tage), mittelfristig (bis zu 20 Jahren), langfristig (über 20 Jahre)) von Bedeutung.



Abbildung 1: Aspekte der Versorgungssicherheit

Für die einzelnen Dimensionen lassen sich unterschiedliche Herangehensweisen und Indikatoren finden, um den Stand der Versorgungssicherheit quantitativ zu beschreiben (Tabelle 1).



	kurzfristig	mittelfristig	Langfristig
Versorgung	Speicher- und Zulieferkapazitäten	Anteil der Erdgasim- porte am Erdgasver- brauch	Reserven und Ressourcen
Transport	Netzkapazitäten und Netzauslastung	Investitionen in Infrastruktur (Pipe- lines, LNG-Terminals)	Verlauf von Trans- portwegen
Nachfrage	Potenzial abschaltba- rer Lasten	Effizienzentwicklung von Anwendungs- technologien	Globale Klimaschutz- bemühungen

Tabelle 1: Mögliche Indikatoren zur Charakterisierung der Versorgungssicherheit

Derartige Ansätze zur Messung der Versorgungssicherheit wurden in der Vergangenheit bereits in unterschiedlichen Studien entwickelt und angewendet. Einen aktuellen Überblick gibt hierzu die REACCES-Studie /REACCESS 2011/. Diese untersucht unterschiedliche Indizes zur Bewertung der Erdgasabhängigkeit in der Erdgaswirtschaft anhand der darin berücksichtigten Indikatoren. Die Indikatoren, die in verschiedenen Indizes in den jeweiligen Studien enthalten sind und eine Möglichkeit aufzeigen, die Erdgasversorgungssicherheit zu bewerten, sind Energiequellendiversifizierung, Energievorratsdiversifizierung, politische Stabilität, Energieressourcen, Marktliquidität, Energieintensität, Energie transport, Bruttoinlandsprodukt, Energieabhängigkeit und Energiequellenübertragbarkeit. Je nach Gewichtung der einzelnen Aspekte und nach der erfolgten Verknüpfung (Shannon Weiner Index, Herfindahl Hirschman Index etc.) ergibt sich eine Fülle unterschiedlicher Messgrößen, die jeweils Vor- und Nachteile aufweisen. Die meisten Vorteile weisen hier der Socioeconomic Energy Risk Index /Marin et al. 2009/ und der Supply/Demand Index for long-term security of supply (S/D-Index) /Scheepers et al. 2007/ auf, obwohl auch hier Infrastrukturaspekte nur unzureichend berücksichtigt werden.

Um modellgestützte Aussagen über die Perspektiven des Erdgaseinsatzes in europäischem Kontext unter Berücksichtigung von Aspekten der Versorgungssicherheit treffen zu können, wurde einerseits der Grad der Detaillierung hinsichtlich der Abbildung des Erdgasmarktes im Energiesystemmodell TIMES PanEU erhöht und anderseits eine Szenarienanalyse durchgeführt, die anschließend auch in Bezug auf die Entwicklung des S/D-Index ausgewertet wurde.

Für die Detaillierung des Energiesystemmodells TIMES PanEU wurde das Erdgasangebot, die Erdgasverteilung durch das Pipelinenetz bzw. alternativ durch die LNG-Lieferung und die Erdgasspeicherung integriert.



Im Rahmen der Szenarienanalyse mit dem Energiesystemmodell TIMES PanEU wurde u. a. untersucht, inwieweit Politiken im Bereich Klimaschutz und bei den Erneuerbaren Energien bzw. die unterstellte Entwicklung der Energiepreise bzw. deren Preisrelation zueinander Einfluss auf den Erdgasabsatz haben. Dafür wird im Rahmen der Szenarienanalyse eine Variation der Parameter Treibhausgasminderungsziel bzw. der Geltungsbereich des Minderungsziels (Anlagen des Emission Trading Systems (ETS) oder darüber hinaus), die Vorgabe hinsichtlich einer Quote bezüglich des Bruttoendenergieverbrauchs an erneuerbaren Energien (BEEV) und einer Variation der Energieträgerpreise vorgenommen, um den damit einhergehenden Primärenergieverbrauch an Erdgas und die Stromerzeugung mittels Erdgas zu ermitteln.

Durch die Verwendung des Energiesystemmodells TIMES PanEU können jedoch nicht nur Aussagen über den Einfluss der verschiedenen Variablen für einen Teil des Energiesystems, die Erdgaswirtschaft, sondern für das im Modell abgebildete Energiesystem insgesamt getroffen werden. Aus wissenschaftlicher Sicht ergibt sich somit ein umfassenderes Bild der Potenziale des Erdgaseinsatzes, mit der Möglichkeit, Substitutionseffekte analysieren zu können. Die Weiterentwicklung des Energiesystemmodells beinhaltete unter anderem auch die Einführung der Druckstufen für das Erdgasnetz und die Abbildung von Speicherkapazitäten. Somit wird es möglich, Fragen der Versorgungssicherheit modellgestützt zu beantworten, basierend auf der vergleichenden Auswertung der Szenarienergebnisse hinsichtlich der Entwicklung des S/D-Index.

Für die Szenarienanalyse ist die Vorgabe von politischen und sozioökonomischen Rahmenannahmen notwendig. Hinsichtlich der Energieträgerpreisentwicklung erfolgte diese in Anlehnung an den World Energy Outlook 2011 der Internationalen Energieagentur (IEA) (110 \$/bbl in 2020; 120 \$/bbl in 2030, 130 \$/bbl in 2050) (IEA 2011). Im Weiteren wird von einem durchschnittlichen Wirtschaftswachstum in Deutschland von 1,1 %/a und einem Rückgang der Bevölkerung bis 2030 auf 79,7 Mio. Einwohner und auf 74,3 Mio. in 2050 ausgegangen. In der Referenzentwicklung wird hinsichtlich der politischen Vorgaben von einem auf den ETS begrenzten Treibhausgasminderungsziel von -21 % bis 2020 gegenüber dem Jahr 2005 und von -34 % bis 2030 ausgegangen. Im Bereich der erneuerbaren Energien wird einerseits vorausgesetzt, dass in Deutschland das EEG fortgeführt wird, d. h., der Anteil des Strom aus erneuerbaren Energien an der Nettostromerzeugung wächst insgesamt auf ca. 30 % in 2020 über 45 % in 2030 auf 60 % bis zum Jahr 2050 an. Anderseits wird zusätzlich angenommen, dass die Quote bezüglich des Bruttoendenergieverbrauchs an erneuerbaren Energien (BEEV) von mindestens 18 % bis 2020 erreicht wird. In den nachfolgen Jahren wird nicht von einer Verschärfung der BEEV Quote ausgegangen. Im Weiteren wird von einem technologischen und ökonomischen Fortschritt für Erneuerbare und Innovative Technologien ausgegangen. Die für den vorliegenden Bericht ausgewählten Szenarien sind in Tabelle 2 zusammengefasst.



Perspektiven der Stromerzeugung aus Erdgas im Rahmen der europäischen Erdgasversorgung

		ETS Min	THG		THG -45% Erdgaspreis		THG -45 % +
			Max	Min	Max		BEEV
ETS- Reduktionsvorgaben gg. 2005	2030	-34 %	-	-	-	-	-
	2050	-75 %	-	-	-	-	-
Treibhausgas- minderungsziel (gesamtes Energie- system) gg. 1990	2030	-	-30 %	-45 %	-45 %	-45 %	-45 %
	2050	-	-50 %	-90 %	-90 %	-90 %	-90 %
Erdgaspreis	2030	7,9 € ₂₀₀₇ /GJ	7,9 € ₂₀₀₇ /GJ	7,9 € ₂₀₀₇ /GJ	4,8 € ₂₀₀₇ /GJ	9,5 € ₂₀₀₇ /GJ	7,9 € ₂₀₀₇ /GJ
	2050	8,5€ ₂₀₀₇ /GJ	8,5 € ₂₀₀₇ /GJ	8,5€ ₂₀₀₇ /GJ	5,1 € ₂₀₀₇ /GJ	10,2 € ₂₀₀₇ /GJ	8,5 € ₂₀₀₇ /GJ
Bruttoenergiever- brauch erneuerbaren Energien (BEEV)	2030	-	-	-	-	-	36 %
	2050	-	-	-	-	-	70 %

Tabelle 2: Szenarienfestlegung zur Analyse der Rolle von Erdgas

5 Projektergebnisse und Ausblick

Derzeit werden ca. 80 % des Erdgases im Wärmemarkt verwendet, d. h., Erdgas wird nur zum geringeren Teil in der Stromerzeugung oder im Bereich Mobilität eingesetzt. Aufgrund der gesetzlichen Rahmenbedingungen für den Wärmemarkt (z. B. EnEV, WärmeEEG) und dem Einsatz effizienter Anwendungstechnologien (z. B. Erdgas-Brennwertkessel anstatt Niedertemperaturkessel oder eventuell zukünftig Gas-Wärmepumpen) ist im Wärmemarkt tendenziell sowohl mit einem Rückgang der Nutzenergienachfrage als auch einem Rückgang des Endenergieverbrauchs zu rechnen, unabhängig von der Entwicklung anderer Bestimmungsfaktoren. Die Entwicklungen im Wärmemarkt sorgen somit tendenziell für eine rückläufige Gasnachfrage. Diese Entwicklung wird von anderen Rahmenbedingungen nur teilweise gedämpft. Vom Emissionshandelssystem ETS ist der Raumwärmebereich nicht betroffen. Im Fall eines auf die am Emissionshandel beteiligten Anlagen begrenzten Minderungszieles hat dieses Auswirkungen auf die öffentliche Strom- und Wärmerzeugung und die energieintensive Industrie jedoch nicht auf die Raumwärmebereitstellung beispielsweise durch Zentralheizungen in Wohn- und Nichtwohngebäuden.



Perspektiven der Stromerzeugung aus Erdgas im Rahmen der europäischen Erdgasversorgung

Die Entwicklungen im Wärmemarkt und der rückläufige Erdgaseinsatz in diesem Bereich sind hauptverantwortlich für den insgesamt rückläufigen Erdgaseinsatz. Im Szenarienvergleich geht zwischen 2012 und 2030 der Primärenergieverbrauch von Erdgas bei der Vorgabe eines ETS-Reduktionsziels von 34 % deutlich um ca. 900 PJ zurück (Spalte ETS -34 % in Abbildung 2). Dieser Rückgang ist nicht ausschließlich auf den Mindereinsatz von Erdgas in der Stromerzeugung zurückzuführen, sondern ergibt sich im Wesentlichen aufgrund der gesetzlichen Rahmenbedingungen im Wärmemarkt, die den Erdgaseinsatz um ca. 700 PJ vor allem im Bereich der Haushalte und des GHD vermindern.



Abbildung 2: Erdgasverbrauch und -einsatz in Deutschland in 2012/2030 im Szenarienvergleich

Verstärkungen beim Treibhausgasminderungsziel bewirken, dass C-haltige Energieträger in geringerem Umfang eingesetzt werden bzw. dass ein Wechsel von C-reicheren zu Cärmeren Energieträgern, d. h. beispielsweise von Kohlen zu Erdgas, vollzogen wird. In Abhängigkeit der Ausgestaltung des Minderungsziels, d. h. einerseits der Höhe der geforderten Minderung und andererseits des Geltungsbereichs, d. h., ob sie, wie im Fall des Emissionshandelssystems (ETS), nur für Anlagen mit einer Feuerwärmeleistung von 20 MW_{therm} gelten, ergeben sich unterschiedliche Auswirkungen auf die Struktur der eingesetzten Energieträger und der Einsatzmengen in den verschiedenen Sektoren.

Eine Ausweitung des Treibhausgasminderungsziels auf alle Sektoren und eine weitere Verschärfung dieser Vorgaben in einer Spannbreite von -30 % bis -50 % in 2030 gegenüber 1990 (Spalte THG Variation -30 % bis -50 % in Abbildung 2) sorgt für einen weiteren Rückgang des Erdgaseinsatzes im Vergleich zum Szenario ETS -34 %, da infolge dessen auch der Erdgaseinsatz im Bereich der Raumwärme- und Brauchwarmwasserbereitstellung sowie der Mobilität unter diese Zielvorgaben fällt.

Wird von einem Treibhausgasminderungsziel von -45 % bis zum Jahr 2030 gegenüber 1990 für alle Sektoren ausgegangen, bewirkt ein Rückgang des Gaspreises (Spalte THG -45 % Erdgaspreis -40 % bis +20 % in Abbildung 2) einen deutlichen Anstieg des Gasein-



satzes sowohl im Bereich der Stromerzeugung als auch im Primärenergieverbrauch an Erdgas insgesamt. Erdgas wird unter diesen Rahmenbedingungen nicht nur im Bereich der Stromerzeugung sondern auch vor allem im Wärmemarkt konkurrenzfähiger. Erdgas verdrängt hierbei jedoch weniger das Heizöl, das bis 2030 unabhängig von den Szenariorandbedingungen einen Großteil seiner Bedeutung einbüßt, sondern wird nochmals stärker im Bereich der industriellen Prozesswärmebereitstellung an Stelle von Steinkohle eingesetzt.

Die Vorgabe einer Sektor übergreifenden Quote für erneuerbare Energien (als Anteil am Bruttoendenergieverbrauch) (BEEV) bei einem THG-Minderungsziel von -45 % in 2030 und den Referenzpreisen würde für einen weiteren Rückgang des Erdgaseinsatzes (Spalte THG -45 % + BEEV 36 % in Abbildung 2) sorgen, da zur Quotenerfüllung die erneuerbaren Energien auch im Wärmemarkt bzw. bei der Mobilität einen Beitrag zu leisten haben. Die BEEV-Quote fördert auch einen vermehrten Einsatz von Solarthermie zur Unterstützung der Brauchwarmwasserbereitstellung und von Umgebungswärme. Aufgrund der schlechteren Arbeitszahl von Erdgaswärmepumpen im Vergleich zu elektrischen Wärmepumpen profitieren diese nicht von der BEEV-Vorgabe. Dadurch ergibt sich im Bereich der Gebäudeheizung nicht nur absolut sondern auch in Bezug auf die versorgten Wohneinheiten ein deutlicher Rückgang.

Hinsichtlich der Entwicklung der Stromerzeugung aus Erdgas ist in der Referenz (ETS -34 %) aufgrund des Ausbaus der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien langfristig die Stromerzeugung aus konventionellen Kraftwerken in Deutschland rückläufig (Abbildung 3). Das Niveau des Rückgangs der Stromerzeugung aus Erdgaskraftwerken bis 2020 wird neben den Erdgaspreisen in Relation zu den Steinkohlepreisen von der Außerbetriebnahme der 2013 bestehenden und von den im Bau befindlichen Steinkohlekraftwerken beeinflusst. Nach dem Jahr 2020 kommt es bis zum Jahr 2030 aufgrund des Wegfalls der Kernkraftwerke zu einem leichten Anstieg der Stromerzeugung aus Erdgas.

In 2030 wird auch bei verstärktem THG-Minderungsziel unter den ökonomischen Basisannahmen die Stromerzeugung aus Erdgaskraftwerken nur unwesentlich gesteigert, da geringe THG-Minderungsziele von -30 % für Europa in 2030 und der gleichzeitig unterstellte Ausbau der erneuerbaren Energien bewirken, dass Deutschland Strom aus Braunkohle- und Steinkohlekraftwerken exportiert. Mit Anstieg des Treibhausgasminderungsziels in 2030 bis 40 % ist im gleichen Maße wie der Stromexport auch die Braun- und Steinkohlestromerzeugung rückläufig. Weitergehende Treibhausgasminderungsvorgaben führen wohl zu einem weiteren Rückgang der Braun- und Steinkohlestromerzeugung aber auch dazu, dass aufgrund von Effizienzsteigerungen die Stromnachfrage in den Nachbarländern weiter abnimmt und dadurch zusätzliche Importkapazitäten für Deutschland existieren. Diese Effekte führen in Summe nur zu einem minimalen Ausbau der Erdgasstromerzeugung.





Abbildung 3: Nettostromerzeugung aus Erdgas in Deutschland in Abhängigkeit des Treibhausgasminderungsziels

Szenarien übergreifend wird Erdgas im Jahr 2030 hauptsächlich in Erdgas GuD-KWK-Anlagen eingesetzt. Mit Fokus auf das Jahr 2050 zeigt sich in Abhängigkeit von der Treibhausgasminderungsvorgabe, dass ein Treibhausgasreduktionsziel für alle Sektoren im Vergleich zu einem ETS-Ziel allgemein zu einem geringeren Einsatz fossiler Brennstoffe in der Stromerzeugung führt, da im Stromsektor im Vergleich zu den anderen Sektoren kostengünstigere THG-Minderungspotenziale vorhanden sind. Mit steigendem THG-Ziel geht insbesondere in 2040 der Gaseinsatz deutlich zurück, da die durchschnittlichen spezifischen CO₂-Emissionen der Stromerzeugung weit unter 100 kg CO₂/MWh zu liegen kommen. Daher können größere Mengen fossiler Brennstoffe zur Stromerzeugung nur noch in CCS-Anlagen eingesetzt werden. Trotz der steigenden Zertifikatspreise reduziert sich der Anteil des Erdgases in der Stromerzeugung, da, basierend auf der angenommenen Energieträgerpreisrelationen zwischen Erdgas und Steinkohle, Kohlen-CCS-Kraftwerke anstatt Erdgaskraftwerke installiert werden. Infolge dessen ist in 2050 die Spannbreite des Gaseinsatzes in der Stromerzeugung bei Variationen der THG-Ziele gering.

Während im Wärmemarkt der Erdgaseinsatz im Wesentlichen durch den durch ordnungspolitische Vorgaben bedingten Rückgang der Nutzenergienachfrage beeinflusst wird, ist dieser im Strommarkt hauptsächlich vom Erdgaspreis in Relation zu den Kohlenpreisen abhängig. Im Jahr 2020 führen bereits bestehende Überkapazitäten auf dem Strommarkt in Deutschland dazu, dass es, unabhängig vom Erdgaspreis, zu keinen weiteren, bisher noch nicht geplanten Investitionen in Erdgaskraftwerke kommt. Die Höhe des Erdgaspreises beeinflusst hierbei vor allem die Nutzungsdauer dieser Kraftwerke. Wird davon ausgegangen, dass langfristig stringente THG-Minderungsziele verfolgt werden, wie dies im



Perspektiven der Stromerzeugung aus Erdgas im Rahmen der europäischen Erdgasversorgung

Szenario THG -75 % der Fall ist, führen niedrigere Gaspreise bis zum Jahr 2030 zu zusätzlichen Investitionen in Gaskraftwerke, weil diese dann über ihre ökomische Lebensdauer kostengünstiger sind als Kohlekraftwerke (Abbildung 4). Im umgekehrten Fall, dass die Gaspreise weiter ansteigen, begünstigt dies die Stromerzeugung aus Kohlenkraftwerken und beschleunigt die Einführung von Braun- und Steinkohlen-CCS-Kraftwerken.



Abbildung 4: Nettostromerzeugung aus Erdgas in Deutschland in Abhängigkeit des Treibhausgasminderungsziels und des Erdgaspreises

Bezogen auf die Variation des Erdgaspreises steigt insbesondere bei einem THG-Minderungsziel von 75 % in 2050 gegenüber 1990 der Gaseinsatz in der Stromerzeugung in Deutschland bei einem rückläufigen Gaspreis an (Abbildung 4). Ein nur geringer Anstieg bzw. ein leichter Rückgang der Erdgaspreise gegenüber heute (z. B. durch Überkapazitäten auf dem Erdgasmarkt) könnten langfristig zur Verdoppelung des Anteils des Erdgases in der Stromerzeugung führen. Bis zum Jahr 2050 ist dafür vor allem der verstärkte Einsatz von Gas-CCS-Kraftwerken die Ursache, die unter diesen Bedingungen wirtschaftlich werden im Vergleich zu den Kohlen-CCS-Kraftwerken. Dies setzt jedoch die kommerzielle Verfügbarkeit und die politische Akzeptanz von CCS-Kraftwerken voraus.

Unabhängig von der Entwicklung der Stromerzeugung aus Erdgaskraftwerken sind Erdgaskraftwerke eine kostengünstige Option, Kapazitäten zur Deckung der Höchstlast bereit zu stellen. Infolge dessen werden die Kapazitäten an Erdgaskraftwerken zukünftig verstärkt nachgefragt, weil der Bedarf an Regelenergie durch den Ausbau der fluktuierenden erneuerbaren Energien steigt.

Bis zum Jahr 2020 ist die Versorgungssicherheit in Europa, gemessen über den S/D Index, leicht rückläufig (vgl. Abbildung 5). Ursachen hierfür sind die höhere Energienachfrage in Europa, die durch einen Anstieg der Primärenergienachfrage an Erdgas und Koh-

Perspektiven der Stromerzeugung aus Erdgas im Rahmen der europäischen Erdgasversorgung



len gedeckt wird, da die Reduktion des spezifischen Energieverbrauchs nicht in gleichem Maße erfolgt. Langfristig, d. h. bis 2050, wenn ein THG-Minderungsziel bzw. die Reduktion der Emissionen des ETS vorausgesetzt wird, erhöht sich der S/D Index. Hauptursache hierfür sind der verstärkte Einsatz erneuerbarer Energien und die höhere Effizienz von Umwandlungs- und Energieanwendungstechnologien. Eine zusätzlich verstärkte Förderung der erneuerbaren Energien trägt nur in geringem Maße zu einem leicht höherem S/ D-Index bei. Durch einen rückläufigen Primärenergieverbrauch an Erdgas verliert Erdgas in Bezug auf die Versorgungssicherheit an Bedeutung. Der Rückgang der "europäischen" Produktion an Erdgas (ungeachtet der möglichen Förderung von Shale gas) fällt hierbei nicht ins Gewicht.



Abbildung 5: S/D Index in Europa in Abhängigkeit des Treibhausgasminderungsziels und des Erneuerbaren Energien Ziels

Versorgungssicherheit umfasst in diesem Kontext nicht die Versorgungszuverlässigkeit, da aufgrund des sinkenden Absatzmarktes nicht die Erdgasmengen sondern fehlende regionale Kapazitäten in Leitungsabschnitten zukünftig Probleme bereiten können. Diesen Aspekten gilt es in eigenständigen Betrachtungen Rechnung zu tragen.

Das neu entwickelte Modellinstrumentarium wurde bereits für weitere Szenarienanalysen im Zusammenhang mit Fragen zur zukünftigen Bedeutung des Erdgases in der deutschen und europäischen Energieversorgung weiter genutzt und im Projekt "Energie- und gesamtwirtschaftliche Auswirkungen veränderter Rahmenbedingungen auf die Nutzung von Erdgas in Deutschland" im Auftrag des Zentrums für Energieforschung Stuttgart (ZfES) eingesetzt. Zudem ist geplant, das neue Modell im Rahmen des Programms "Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg" (KLIMOPASS) der baden-württembergischen Landesregierung für das Teilvorhaben "Energiewirtschaftliche Effekte des



Klimawandels in Baden-Württemberg – Auswirkungen auf Energienachfrage und -angebot" zu nutzen, um die erzielten Fortschritte in der Modellierung weiter anzuwenden und zu vertiefen.

6 Wesentliche terminliche und inhaltliche Abweichungen zum Projektantrag

Das Projekt hatte eine Laufzeit vom 1. August 2009 bis zum 31. Juli 2013. In diesem Zeitraum wurden die Arbeiten durchgeführt und erfolgreich abgeschlossen.

7 Publikationen und Patente

7.1 Im Rahmen des Projektes entstandene Publikationen

7.1.1 Begutachtete Publikationen

[1] M. Blesl, T. Kober, D. Bruchof, R. Kuder (2010): Effects of climate and energy policy related measures and targets on the future structure of the European energy system in 2020 and beyond, Energy Policy 38 (2010) 6278–6292

7.1.2 Nicht-begutachtete Publikationen

- [2] M. Blesl (2010): Natural gas supply for Europe: an analysis with TIAM-IER, Vortrag gehalten anlässlich des Workshops "Joint TERI-ETSAP Workshop" in New Dehli am 22. Januar 2010, veranstaltet von ETSAP – Energy Technology Systems Analysis Program
- [3] M. Culka, U. Fahl, A. Voß (2013): Statistical analysis of explaining variables on the primary energy consumption of Natural Gas in Germany in 2030, eingereicht bei: The Energy Journal, International Association for Energy Economics

7.2 Gemeinsame Publikationen zweier oder mehrere KW21 Teilprojekte

Keine

7.3 Weitere Publikationen

- [4] Blesl et al. 2008 M. Blesl, T. Kober, D. Bruchof, R. Kuder: Beitrag von technologischen und strukturellen Veränderungen im Energiesystem der EU27 zur Erreichung ambitionierter Klimaschutzziele; in: Zeitschrift für Energiewirtschaft (ZfE), Vol. 32 (2008), Heft 4, p. 219 – 229
- [5] Blesl et al. 2009; M. Blesl, C. Cosmi, V. Cuomo, S. Kypreos, M. Salvia, D. van Regemorter: Final report on the integrated Pan-European Model. NEEDS New Energy Externalities Developments for Sustainability Integrated Project, Technical Report n° T5.20 – RS 2a, Brussels, 2009



- [6] Blesl et al. 2010; M. Blesl, T. Kober, D. Bruchof, R. Kuder: Effects of climate and energy policy related measures and targets on the future structure of the European energy system in 2020 and beyond, Energy Policy 38 (2010) 6278– 6292
- [7] Blesl et al. 2011a; M. Blesl, D. Bruchof, U. Fahl, T. Kober, R. Kuder, B. Götz, A. Voß: Integrierte Szenarioanalysen zu Energie- und Klimaschutzstrategien in Deutschland in einem Post-Kyoto-Regime; Forschungsbericht des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Band 106, Februar 2011
- [8] Blesl et al. 2011b; M. Blesl, T. Kober, R. Kuder, D. Bruchof: Implications of different climate protection regimes for the EU27 and its member states through 2050, Climate Policy, DOI: 10.1080/14693062.2011.637815
- [9] EWI et al. 2010; M. Schlesinger, D. Lindenberger, C. Lutz: Energieszenarien für das Energiekonzept der Bundesregierung, Studie für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, August 2010
- [10] IEA 2010; International Energy Agency: World Energy Outlook 2010, Paris 2010
- [11] IEA 2011; International Energy Agency: World Energy Outlook 2011, Paris 2011
- [12] Marin et al. 2009; J. M. Marin, C. Velasco, J. Garcia-Verdugo, G. Escribano, R. Mahia, R. De Arce: Quantification of socioeconomic risk proposal for an index of security of supply, Technical Note 4.5-1 and 4.5-2 REACCESS Project, EC-FP7
- [13] REACCESS 2011; B. Munoz Delgado: Energy security indices in Europe. 2011, http://www.eforenergy.org/docactividades/22/BMunoz.pdf
- [14] Scheepers et al. 2007; M. Scheepers, A. Seebregts : EU Standards for Energy Security of Supply. 2006. http://www.ecn.nl/docs/library/report/2006/c06039.pdf

7.4 Im Rahmen des Projektes entstandene Patente

Keine

8 Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses

8.1 Studentische Mitarbeiter

Beier, Michael	Datenrechere Erdgasangebot und -absatzmärkte
Broydo, Michael	Analyse des Wärmemarktes
Guitu, Ana	Analyse von KWK-Anlagen
Leinweber, Ina	Datenrechere Erdgasangebot und -absatzmärkte
Salomatina, Iryna	Analyse der Gasverwendung



8.2 Studien-, Semester- und Bachelorarbeiten

Mona Mutz:	Wirtschaftlicher Einsatz von Mikrogasturbinen bei hohen Prozesstemperaturen, September 2011
Robin Hoffmann:	Quantitative Methoden zur Bestimmung der Versorgungs- sicherheit in der Erdgaswirtschaft, Oktober 2012

8.3 Diplom- und Masterarbeiten

Ina Leinweber: Erdgasversorgung Europa – Analyse der Versorgungssicherheit und -risiken und der Preisbildung des Europäischen Erdgasmarktes

8.4 Promotionen

Promotionen sind im Rahmen des Teilprojektes nicht entstanden.

9 Weitere Drittmittel zum Projektthema

9.1 Angaben, ob weitere Drittmittel zum Projektthema eingeworben wurden, insbesondere aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen des Bundes und der EU

EU – FP7	REACCESS – Risk of Energy Availability: Common Corridors for Europe Supply Security
EU – FP7	ATEsT – Analysing Transition Planning and Systemic Energy Planning Tools for the implementation of the Energy Technology Information System
ZfES	Energie- und gesamtwirtschaftliche Auswirkungen veränderter Rahmenbedingungen auf die Nutzung von Erdgas in Deutschland, Zentrum für Energieforschung Stuttgart
EnBW AG	Analyse des Wärmemarktes inkl. Kälte und Klimatisierung in Deutschland und Baden-Württemberg

9.2 Geplante Antragstellung bzw. künftige Förderung aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen von Bund, EU etc. sowie allgemeinen Förderprogrammen (z.B. DFG)

Es ist keine weitere Antragsstellung zu diesem Thema geplant.



DE

Arbeitskreis Kraftwerkssysteme und Dampferzeuger Dr. Martin Käß, EnBW Erneuerbare und Konventionelle Erzeugung AG, Stuttgart

- BY 4DE: Reduktion von Verschlackungstendenzen in Abhängigkeit von Betriebsparametern und Brennstoff an den Strahlungsheizflächen moderner Kraftwerke
- BY 5DE: Modellierung des dynamischen Verhaltens von 700 °C-Kraftwerken
- BY 6DE: Entwicklung von hocheffizienten Kraftwerken zur Nutzung regenerativer Energie aus Abfall (Effiziente Energieerzeugung aus Abfall)
- BY 7DE: Entwicklung und Charakterisierung innovativer nanokeramischer Funktionsschichten auf Precursorbasis f
 ür den Einsatz in M
 üllverbrennungs- und Biomasseverbrennungsanlagen als Korrosionsschutzsystem
- BW L 25DE: Untersuchung der flammlosen Oxidation zur schadstoffarmen und effizienten Verbrennung von Kohlestaub in Kraftwerken
- BW W 25DE: Erprobung eines FLOX-Brenners für Kohlenstaubverbrennung im halbtechnischen Maßstab
- BW L 26DE: Untersuchung der physikalisch-chemischen Vorgänge bei der Umwandlung von Kohlemineralien zur Reduktion von Verschlackungstendenzen an den Strahlungsheizflächen moderner Kraftwerke
- BW W 26DE: Reduktion von Verschlackungstendenzen in Abhängigkeit von Betriebsparametern und Brennstoff an den Strahlungsheizflächen moderner Kraftwerke
- BW L 27DE: Grundlegende experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Entwicklung von innovativen Brennertechnologien und Feuerungskonzepten für den Einsatz in CO₂-armen Kohlekraftwerken (Oxyfuel-Kraftwerken)
- BW W 27DE: Halbtechnische Untersuchungen von innovativen Brennertechnologien und Feuerungskonzepten für den Einsatz in steinkohlebefeuerten Oxyfuel-Kraftwerken
- BW L 29DE: Untersuchung von Schweißungen an Nickelbasislegierungen mit Hilfe thermischer Simulation und Klärung von Schädigungsmechanismen in hochtemperaturbeanspruchten Schweißnähten
- BW W 29DE: Optimierung der Schweißverfahren an Nickelbasislegierungen in dick- und dünnwandigen Kesselbauteilen zur Vermeidung von Fehlern in hochtemperaturbeanspruchten Schweißnähten



Arbeitskreis Kraftwerkssysteme und Dampferzeuger

Projekt: BY 04DE

Reduktion von Verschlackungstendenzen in Abhängigkeit von Betriebsparametern und Brennstoff an den Strahlungsheizflächen moderner Kraftwerke

Projektleiter:	Prof. DrIng. H Spliethoff Lehrstuhl für Energiesysteme Technische Universität München
Mitarbeiter:	DiplIng. Christoph Wieland
	DiplIng. (FH) Ulrich Kleinhans
	DiplIng. Benjamin Kreutzkam
Finanzierung:	EnBW Kraftwerke AG
	Bayerisches Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst
	Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie

1 Ausgangssituation

Aufgrund der starken Schwankungen der Brennstoffzusammensetzung von Importkohle resultieren drastische Betriebsproblematiken und damit auch Aufgabenstellungen. Der Kraftwerkseinsatz muss bezüglich des Brennstoffes eine möglichst hohe Flexibilität aufweisen. Die Importströme von Rohkohle nach Europa unterliegen marktwirtschaftlichen Schwankungen [8]. In den letzten Jahren haben die Lieferungen aus Russland und Südamerika auf Kosten von Importen aus Südafrika und Australien deutlich zugenommen. Dadurch sind bestimmte Kohlen nur eingeschränkt am deutschen bzw. europäischen Markt verfügbar. Die Kohlen besitzen je nach Herkunft unterschiedliche Qualitäten, was sich im Heizwert, Aschegehalt und der elementaren Zusammensetzung zeigt. Dabei treten neben den Verschlackungsproblematiken noch weitere betriebstechnische Probleme, wie bspw. eingeschränkte Volllastfähigkeit, erhöhter Verschleiß und Kohleselbstentzündung auf dem Lagerplatz [8] auf.

Auf der anderen Seite führt der zunehmende Ausbau der erneuerbaren Energien insbesondere in Deutschland dazu, dass die, ursprünglich für Grundlast ausgelegten Kohlekraftwer-



Reduktion von Verschlackungstendenzen

ke immer häufigeren, kurzfristigen Lastwechseln unterworfen sind. Dadurch ergeben sich u.a. Temperaturspitzen in der Feuerung und erhöhte Materialbeanspruchungen (BY 5DE).

Solche Temperaturspitzen und noch viele weitere Effekte können das Problem der Ascheablagerungen verstärken. Nach [9] gibt es eine Vielzahl von Parametern, die das Verschlackungspotential beeinflussen können. Dabei kann man im Wesentlichen zwischen konstruktiven Aspekten und betriebsbedingten Parametern unterscheiden.

Unter den konstruktiven Aspekten versteht man Auslegungsparameter, wie etwa die Brennkammer-Austrittstemperatur, die Anordnung der Wärmetauscher im Rauchgaspfad, die Verbrennungsführung, bis hin zu Geometrie und Material der einzelnen Rohre.

Die beeinflussenden Betriebsparameter sind unter anderem Brennstoff, Betriebsart des Kraftwerks, Brennstoffaufmahlung und die angewendete Reinigungsstrategie.

Im Rahmen des Projektes wird daher versucht ein tieferes Verständnis der Schlackebildung zu erlangen. Ziel ist es auch bei schwierigen Kohlen mit hohem Verschlackungspotential und bei variabler Kesselfahrweise durch die Verbrennungsführung die Verschlackungen und Depositionen gering zu halten.

Eine detailliertere Betrachtung vom Stand der Technik ist in [7] und [11] zu finden.

2 Projektziele

Im Rahmen des beantragten Forschungsprojektes sollen grundlagenorientierte Forschungsarbeiten im Bereich der Verschlackungsbildung in kohlegefeuerten Kraftwerken durchgeführt werden.

Der Schwerpunkt liegt hierbei auf grundlegenden Untersuchungen zum Ablauf von Reaktionen und Mechanismen, die zur Bildung von Ablagerungen und Verschlackung führen. Im Rahmen des Projektes sollen Brennstoffe umfassenden Analysen unterzogen werden und dabei auch Einsatz in Versuchsanlagen finden.

Neben der experimentellen Untersuchung sollen auch numerische Modelle für die Partikel- bzw. Aschegrößenverteilung, die Depositionsentstehung und die Struktur der Depositionen untersucht werden. Eine Bilanzierung der Ascheumwandlungen von Mühle über Brenner und Depositionen bis hin zur E-Filter Asche soll am Großkraftwerk durchgeführt werden.

2.1 Umsetzung der Hinweise aus den bisherigen Begutachtungen

Verzögerungen im Vorhaben: Verzögerungen aufgrund von Anlagennutzung (Flugstromreaktor), Lieferzeiten und die Verfügbarkeit des Kraftwerks für Messungen führten zu Abweichungen vom ursprünglichen Zeitplan. Die Verzögerungen im Vorhaben wurden eingeholt. Ein Abschluss des Projektes innerhalb der Laufzeit ist gegeben. Das Projekt hat die wesentlichen Meilensteine erreicht.

Die Beschreibung der Arbeiten ist teilweise extrem kurz: Aufgrund der Layout-Vorgaben für Berichte können die Ergebnisse nicht detaillierter dargestellt werden. Immerhin konnte erwirkt werden, dass der Ergebnisteil bis auf 12 Seiten ausgedehnt werden kann.



Die Literaturliste anderer Autoren wird als unvollständiger Auszug verstanden: Eine vollständige Literaturliste bzw. -recherche ist nicht Teil eines Berichtes, sondern vielmehr die Datenbasis und Grundlage des Projektes.

Die Publikationsleistung ist verbesserungswürdig: Es wurden mehrere Konferenzen und Journalpublikationen im Rahmen des Projektes veröffentlicht (siehe Publikationsliste). Weitere sind in Planung und werden erst nach Abschluss des Projektes publiziert werden können.

3 Vernetzung

3.1 Vernetzung innerhalb KW21

Mit dem Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart ist eine enge Kooperation umgesetzt worden. Die gemeinsame Messkampagne im Kraftwerk Altbach-Deizisau und die gemeinsamen Präsentationen auf den Projektmeetings fordern und fördern eine intensive Zusammenarbeit der beiden Institute.

Die Brennstoff-, Asche- und Depositionsproben von Versuchen am IFK wurden zum größten Teil am Lehrstuhl für Energiesysteme (LES) untersucht. Aber auch ICP Ascheanalysen wurden vom IFK dem LES zur Verfügung gestellt. Das IFK übernahm auch die Kohleaufbereitung für die vorgesehenen Versuche am LES.

Mit dem Industriepartner fanden regelmäßige Treffen statt. Diese wurden in etwa sechsmonatigem Turnus abgehalten. Im Rahmen der Messkampagne im Kraftwerk Altbach-Deizisau hat der Industriepartner die forschenden Universitäten mit umfangreichen Betriebsparametern versorgt, um eine exakte Bewertung der Last und der Betriebsparameter durchführen zu können.

Aufgrund von Projektpräsentationen im Rahmen der Arbeitskreismeetings wurden auf Anfrage der Uni Bayreuth für das Teilprojekt BY 7 DE thermodynamische Gleichgewichtsbetrachtungen von Depositionsproben aus Müllverbrennungsanlagen durchgeführt. Die Ableitung von Schmelzphasenanteilen und Umwandlungsprozessen in Aschen und Depositionen sind auch bei Müllverbrennung von Interesse. Erste Ergebnisse wurden der Partneruniversität bereits zur Verfügung gestellt.

Im Teilprojekt BY 6 DE konnten die gewonnen Erfahrungen aus der Messkampagne genutzt werden, um die dort geplante Messkampagne zu optimieren und erfolgreich abzuschließen.

3.2 Vernetzung außerhalb KW21

Im Rahmen des Relcom-Projektes (EU FP7) am LES sind FTIR-Emissivitätsmessungen bei der Oxyfuel-Verbrennung vorgesehen. Für Vergleichsmessungen wurde eine optische Öffnung des Flugstromreaktors während der Verbrennungsversuche zur Verfügung gestellt. Das von Herr Dias betreute Messgerät kam bei ausgewählten Verbrennungsversuchen zum Einsatz.



Reduktion von Verschlackungstendenzen

Im Rahmen des HotVegas-Projektes (BMWi) am LES wurden Messungen mit einem 2-Farben-Pyrometer durchgeführt. Damit können sowohl Partikeltemperatur, als auch Partikelgröße bei der Verbrennung bestimmt werden. Auch hier wurde ein optischer Zugang des Flugstromreaktors während den KW21-Verbrennungsversuchen für Vergleichsmessungen zur Verfügung gestellt.

Daneben fand eine Vernetzung außerhalb von KW21 lehrstuhlintern auf Basis des erarbeiteten Know-Hows statt. Methoden aus dem KW21 Projekt wurden auch teilweise auf biogene Brennstoffe transferiert.

4 Vorgehensweise und Methodik

Das Projekt fußt auf einer breiten Analysedatenbank mit Brennstoffen, die für den Industriepartner von Relevanz sind und in seinen Kraftwerken eingesetzt werden. Basierend auf diesen Analysen wurden dann die Brennstoffe für die Verbrennungsuntersuchungen in den Versuchsanlagen der beteiligten Universitäten ausgewählt. Zudem wurden die Brennstoffe aus den Messkampagnen untersucht. Die Auswahl erfolgt dabei kaskadenartig mit einer Reduktion der Anzahl an Brennstoffen hin zu größeren Anlagen. Die aus den Experimenten gewonnenen Ergebnisse werden dann zur Entwicklung von Modellen für

- · Depositionsbildung und Struktur,
- · Aschetransport und
- Flugaschegrößenverteilung

verwendet.







5 Projektergebnisse und Ausblick

5.1 Brennstoffdatenbank

Während des Projektes wurden hauptsächlich Steinkohlen untersucht. Eine Brennstoffdatenbank mit den untersuchten Brennstoffen wurde erstellt und wird nach Projektende der EnBW zur Verfügung gestellt. Nachfolgend werden die Untersuchungsmethoden kurz vorgestellt und bewertet.

5.1.1 Standardanalyse

Die Standardanalyse der Brennstoffe wurde entsprechend einschlägiger DIN-Normen im Analyselabor des LES durchgeführt (u.a. [12], [13], [14]). Die Elementarzusammensetzung des Brennstoffes wurde in einem Vario Macro der Firma Elementar analysiert.

5.1.2 Ascheschmelzverhalten

Für die Bestimmung des Ascheschmelzverhaltens wurde ein Ascheschmelzmikroskop (ASM) der Firma Hesse Instruments angewandt. Die Analyse wurde entsprechend [15] durchgeführt.

5.1.3 Chemische Fraktionierung

Für das "Leaching" oder Auswaschen des Brennstoffes wurde ein geeignetes Vorgehen aus der Literatur ausgewählt [16]. Dabei wird der Brennstoff oder die Asche sukzessive in Wasser, Ammoniumacetat und Salzsäure gewaschen und die Löslichkeit der einzelnen Komponenten bewertet. Je nach Löslichkeit kann den Aschekomponenten dann eine unterschiedliche Reaktivität zugeordnet werden. Aufgrund der Komplexität und des hohen analytischen Aufwandes konnte das nur für einen Teil der Brennstoffe durchgeführt werden.

5.1.4 TGA-Untersuchungen

Für die thermogravimetrischen Messungen (TGA) stand eine Thermowaage der Firma Linseis zur Verfügung. Durch die Kopplung mit einer Gasmischstrecke können damit definierte Atmosphären in der Thermowaage eingestellt werden. Schwerpunkt der Untersuchungen war die Bestimmung des Schmelzphasenanteils in einer STA-Messung (Simultaneous Thermal Analysis), bei der parallel zur Gewichtsabnahme auch die Temperaturänderung zu einer Referenz-Probe gemessen wird. Damit können qualitative Aussagen über die Phasenumwandlungen in der Asche getroffen werden. Daneben wurde noch die Durchführbarkeit von Kurzanalysen mittels TGA untersucht [17].

5.1.5 Emissivitäten

Emissivitätsmessungen für die Endsdorfer Braunkohle wurden vom ZAE-Bayern durchgeführt. Allerdings konnten Literaturwerte der Universität Bochum aus [19] nicht reproduziert werden. Es wurde daher beschlossen die Emissivitätsmessungen nicht weiter zu fokussieren. Der Mehrwert für das vorliegende Forschungsvorhaben ist gering.

5.1.6 Bewertung

Mittels Leaching kann die Reaktivität von Aschen bestimmt werden und damit ein erster Indikator für die Freisetzung von Feinstaub bzw. die Haftneigung gewonnen werden. Diese Analysen sind allerdings recht aufwändig. Eine Weiterverwendung der Daten für thermodynamische Gleichgewichtsrechnungen oder die Feinstaubentstehung ist daher zu empfehlen, um entsprechenden Mehrwert durch die Daten zu generieren.

Die TGA-STA Analysen sind vielversprechend für die Bewertung der Haftwahrscheinlichkeit. Für die Kurzanalyse der Brennstoffe sind sie aber zu aufwändig.

Basierend auf den Analysen wurden gängige (nach [19]) und neue Verschlackungsindizes für die Kohlen bestimmt und diese hinsichtlich ihrer Verschlackungsneigung bewertet.

5.2 Versuche am Flugstromreaktor

Im Flugstromreaktor am LES wurden Verbrennungsversuche durchgeführt. Zwei Parameter, Stöchiometrie und Temperatur, wurden dabei variiert. Abbildung 8 zeigt den schematischen Aufbau des Reaktors. Daneben wurde eine optische Depositionsmessung für Online-Messungen entwickelt und der zeitliche Depositionsaufbau untersucht.

5.2.1 Versuchsprogramm

Die Versuche wurden mit vier Steinkohlen (Pittsburgh #8, Peabody, El Cerrejon und Calentur) bei Temperaturen von 1200, 1300 und 1400 °C durchgeführt. Pro Brennstoff und Temperatur wurden jeweils die Stöchiometrien bei λ=0,8, 1,0 und 1,2 für eine Brennstoffmenge von jeweils 2 kg angefahren. Es ergibt sich eine Versuchsmatrix von 36 Versuchen. Die Versuchsdauer wurde jeweils so gewählt, dass immer die gleiche Masse an Brennstoff eingetragen wurde um das Depositionsgewicht direkt vergleichen zu können. Für die Variation der Stöchiometrie wurde ein konstanter Luftvolumenstrom eingestellt und der Brennstoffmassenstrom entsprechend angepasst, welcher zuvor anhand der Brennstoffanalyse errechnet wurde. Durch dieses Vorgehen ändert sich die Strömungsform beim Brenner während der Versuche kaum und die Verweilzeit der Partikel im Reaktor ist nahezu konstant.

Zahlreiche Optimierungsmaßnahmen wurden zudem im Rahmen des Projektes umgesetzt. Unter anderem wurde die Brennstoffdosierung verbessert und ein neuer Brenner konstruiert. Anstatt der existierenden Förderschnecke wurde auf eine Vibrorinne umgestellt, um einen gleichmäßigen Brennstoffeintrag realisieren zu können.

5.2.2 Optische Depositionsraten-Messung

Das Messprinzip orientiert sich in seiner Funktion am Ascheschmelzmikroskop [15]. Mit einer Kamera wird ein Schattenbild der Depositionssonde aufgezeichnet, welches mit einem von der TUM entwickelten Postprocessing ausgewertet werden kann. Es wird jeweils die mittlere Depositionshöhe über den Bildausschnitt bestimmt und ausgewertet. Da sich der Ausschnitt in der Kernströmung befindet, wird eine gleichmäßige Ablagerungsrate unterstellt. Das Messprinzip ist in Abbildung 1 dargestellt. Bei hohen Temperaturen (>1000 °C) vor einem kalten Hintergrund (schwarzer Bereich in Abbildung 1 rechts) ist ausreichend Kontrast für eine Auswertung vorhanden.





Abbildung 1: Funktionsprinzip der Online-Messung zum Depositionsaufbaus

Abbildung 2 zeigt exemplarisch einen Versuch mit der Steinkohle Pittsburgh #8 bei 1200°C und λ =1,2. Es ist zu erkennen, dass die Depositionen nach einer bestimmten Höhe abgereinigt werden. Diese Zeitpunkte fallen mit unterstöchiometrischen Verbrennungsbedingungen zusammen, welche dadurch zustande kommen, dass sich Brennstoff in der Zuleitung zum Brenner ablagert und hin und wieder abfällt. Dadurch steigt die Partikelbeladung im Rauchgas an und die Verbrennung wird unterstöchiometrisch. Der erhöhte Sauerstoffgehalt ist auf Falschlufteintrag zurückzuführen. Die Ausreißer nach oben bei der Sauerstoffmessung sind auf die Reinigung der Probenahmesonde zurückzuführen, die mit Druckluft gespült wird.





Abbildung 2: Zeitlicher Depositionsaufbau und Rauchgasmessung (Sauerstoff)

Abbildung 3: Abgeleitete Depositionsraten für die Pittsburgh #8

In Abbildung 3 sind die Depositionsraten für die Kohle Pittsburgh #8 zu sehen. Die Depositionsraten sind zwar über der Zeit abgeleitet worden, die Darstellung ist aber auf die Brennstoffmasse bezogen. Es ist zu erkennen, dass die Depositionshöhe mit steigender Temperatur und steigendem Sauerstoffgehalt jeweils abnimmt. Ähnliche Verhalten wurden auch bei anderen untersuchten Steinkohlen beobachtet.



Reduktion von Verschlackungstendenzen

In Abbildung 4 sind die Frontansichten der untersuchten Steinkohlen zu sehen. Es ist zu erkennen, dass Pittsburgh #8 und Peabody stark wuchernde Depositionen bilden, die sehr porös und leicht abreinigbar sind. Die Deposition bei Pittsburgh #8 (1200 °C) ist nach dem Versuch abgefallen, da keine ausreichende Haftung bei den niedrigen Temperaturen gegeben war. Sie bildet aber auch dort ähnlich wuchernde Depositionen wie Peabody. Bei 1400 °C sind auch diese Depositionen stark versintert und nur schwer abreinigbar, allerdings immer noch mit signifikanter Porosität. El Cerrejon und Calentur sintern schon bei niedrigeren Temperaturen. Bei 1400 °C liegt die Kohle El Cerrjon vollständig aufgeschmolzen vor.



Abbildung 4: Frontansicht der Depositionssonden der Steinkohlen bei λ=1,2

5.3 Messkampagnen in Altbach/Deizisau

Es wurden im Laufe des Projektes zwei Messkampagnen im HKW Altbach/Deizisau durchgeführt (30.11.2009 – 11.12.2009 und 06.02.2012 – 24.02.2012). Das HKW ist stein-kohlegefeuert und hat eine elektrische Leistung von 330 MW_{el} (η_{el} = 41,3 %) bei einer maximalen Fernwärmeauskopplung von 280 MW_{th} (η_{er} > 80 %). Folgende Kohlen wurden während den Messkampagnen verfeuert: Pittsburgh #8 (2009), Calentur (bis 24.02.2012) und Peabody (ab 24.02.2012). Die Messkampagnen fanden in Zusammenarbeit mit dem IFK statt. Der LES war verantwortlich für Rauchgasmessungen, Kohleprobenahme, Staubprobenahme (am E-Filter) und die Auswertung der Kraftwerksdaten.

5.3.1 Auswertung der Kraftwerksdaten

Mit den, von EnBW, bereitgestellten Betriebsdaten wurde ein detailliertes Modell zur Bilanzierung des Kessels in Matlab umgesetzt. Damit konnten dann zu den Messzeitpunkten die jeweiligen Betriebszustände bestimmt werden (Abbildung 5). Die Bilanz liefert Randbedingungen und Validierungsgrößen für die CFD Simulation, aber auch Vergleichs-



0.73

Reduktion von Verschlackungstendenzen

werte zu den Messungen, wie beispielsweise bei der Rauchgaszusammenseztung (Abbildung 6). Zudem muss bei der Bewertung der Depositionsproben der Lastzustand bekannt sein.

0.30





Abbildung 5: Wärmenbilanz um den Kessel (09.12.2009)



5.3.2 Rauchgaszusammensetzung

Auf Ebene 34 m oberhalb der Ausbrandluft wurden Rauchgasmessungen von der TUM durchgeführt. Die Messwerte stimmen dabei gut mit denen der EnBW und den theoretischen, aus der Verbrennungsrechnung stammenden, Daten für CO₂ und O₂ überein (siehe Tabelle 1). Die Abweichungen beim CO sind durch die Messposition zu erklären. Da die EnBW Messung am Ende des Rauchgaspfades liegt, reagiert das CO noch weiter und wird nahezu vollständig umgesetzt.

09.12.2009	Messung TUM	Berechnet	Messung EnBW
O ₂ [vol%]	2,60	1,80	3,20
CO ₂ [vol%]	15,90	15,70	Х
CO [ppm]	206,40	Х	9,60
NO _x [ppm]	180,30	Х	228,30
SO ₂ [ppm]	631,90	742,20	813,80

Tabelle 1: Rauchgasmessungen im Vergleich

5.3.3 Probenahme der Stoffströme

Die Zuteiler und die E-Filter wurden während der Messkampagne regelmäßig beprobt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 12 zu sehen.



5.4 Entwicklung eines Haftkriteriums

Die Depositions- und Haftkriterien sind ein wichtiges Werkzeug bei der Modellierung bzw. Simulation von Verschlackungen. Dabei sind in der Vergangenheit unterschiedlichste Ansätze verfolgt worden. Allgemein anerkannt ist eine Bewertung der Haftwahrscheinlichkeit auf Basis der dynamischen Viskosität, welche durch empirische Korrelationen aus der Aschezusammensetzung ermittelt wird. Allerdings beruhen diese auf der Annahme einer kritischen Viskosität, was die Bewertung dadurch höchst empirisch macht. In der Literatur sind kritische Viskositäten über acht Größenordnungen von bis zu finden [20]. Daher sind im Rahmen des Projektes unterschiedliche Viskositätsmodelle, experimentell ermittelte Kriterien (ASM, STA) und Ergebnisse aus Gleichgewichtsrechnungen mit FactSage untereinander verglichen und bewertet worden. Aus den gewonnen Daten wurden dann Haftwahrscheinlichkeiten abgeleitet und diese in CFD-Simulationen angewendet, um auch quantitative Aussagen über die Verschlackung treffen zu können. Weiterführende Informationen zu den verschiedenen Haftkriterien können in der Veröffentlichung von Wieland et al. 2012 gefunden werden [1].



Abbildung 7: Entwicklung eines Haftkriteriums (am Beispiel Pittsburgh #8)

Abbildung 7 vergleicht drei Haftkriterien, die im Rahmen der Simulation untersucht wurden. Exemplarisch sind Haftkriterien für die Steinkohle Pittsburgh #8 dargestellt. Die Fact-Sage Berechnungen basieren auf der Berechnung des thermodynamischen Gleichgewichtes. Für weitergehende Informationen sei wiederum auf die Veröffentlichungen von Wieland et. al. 2012 verwiesen [1]. Es ist zu erkennen, dass die STA-Analyse den Verlauf der FactSage Berechnungen recht gut trifft. Weiterhin fällt auf, dass die charakteristischen Temperaturen des Ascheschmelzmikroskops nach rechts zu höheren Temperaturen verschoben sind. Der Grund hierfür könnte in den niedrigen Aufheizraten liegen oder aber auch in der empirischen Natur der Ascheschmelzuntersuchungen, bei der die Bestimmung der Temperaturen auf der Geometrie eines Probekörpers basiert.

Als Haftkriterium für die numerische Simulation lieferten die Daten der FactSage Berechnungen sehr gute Ergebnisse und werden zur Beurteilung des Verschlackungsverhaltens von Steinkohlen empfohlen.


5.5 Numerische Simulation und Modellentwicklung

Der Schwerpunkt der Simulationstätigkeiten am LES lag auf der Modellentwicklung von Aschetransport und Ablagerungsmechanismen basierend auf dem Flugstromreaktor. Dabei wurden zunächst die Vorgänge der Staubfeuerung im Flugstromreaktor abgebildet und auf dessen Basis Modelle zur Partikelgrößenverteilung (siehe Fragmentationsmodell; Kapitel 5.5.2), zur Vorhersage der zeitlichen Depositionsentwicklung und deren Eigenschaften sowie zur Beschreibung der Feinstaubbildung entwickelt.

5.5.1 Modellierung des Flugstromreaktors

Bei der Modellierung des Flugstromreaktors muss eine Vielzahl von Vorgängen mit physikalischen Modellen beschrieben werden. Abbildung 8 zeigt den schematischen Aufbau des Flugstromreaktors sowie das verwendete Berechnungsgitter. Mit berücksichtigt im Berechnungsgitter ist die Keramiksonde, die als zusätzliche Domäne definiert wurde.

Zu Beginn wurde der Einfluss des Netzes auf den Verbrennungsvorgang, die Aschebildung sowie die Depositionsrate untersucht. Es stellte sich heraus, dass sowohl die Verbrennung mit ihren charakteristischen Größen, wie Rauchgastemperatur und Geschwindigkeitsfeld, als auch die Rauchgaszusammensetzung mit relativ geringem Aufwand zu modellieren sind. Ein Netz mit einer Knotenanzahl von ca. 400.000 ist hierfür ausreichend. Die Konvergenz des Strömungsfeldes wurde nach ca. 6.000 Iterationsschritten erreicht. Betrachtet man allerdings den Einfluss des Gitters auf die Partikelflugbahnen gerade im Bereich der quer angeströmten Depositionssonde, so ist ein erheblicher Einfluss des Netzes zu erkennen. Abbildung 9 zeigt ein typisches Netz und dessen Auflösung, welche nötig ist, um netzunabhängige und stabile Ergebnisse zu erzielen. Weiterhin stellte es sich als vorteilhaft heraus den Depositionsmassenstrom auf die Sonde als Konvergenzkriterium zu verwenden. Erst wenn dieser stationär ist, in der Regel nach etwa 8.000 Iterationen, kann die Berechnung gestoppt werden. Der Einfluss der Netzgröße auf die Depositionsrate ist in Abbildung 10 zu sehen. Die Depositionsrate wurde über mehrere Iterationsschritte gemittelt und maximal auftretende Abweichungen angegeben. Dabei spielen gerade die Knotenpunkte in Umfangs- und radialer Richtung eine entscheidene Rolle (siehe auch [21]).





Abbildung 8: Schematische Darstellung des Flugstromreaktor (links), Gitter und Simulationsergebnis (rechts)

Abbildung 8 rechts zeigt zudem 500 der ca. 30.000 berechneten Partikelflugbahnen und deren Temperatur entlang der Flugbahn durch den Reaktor. Man kann im oberen Teil den Bereich der Pyrolyse so wie den Flüchtigenabbrand an den hohen Temperaturen erkennen. Das hier gezeigte Beispiel ist eine Berechnung für die Kohle Pittsburgh #8 bei einer Wandtemperatur von 1300°C und einer Luftzahl von 1,2. Um die Feststoffverbrennung und insbesondere das Verschlackungsverhalten korrekt zu beschreiben, muss vor allem bei der Vernetzung, den Randbedingungen sowie der Brennstoffcharakterisierung sorgfältig vorgegangen werden.

Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass eine der entscheidenden Größen der Partikeldurchmesser ist, insbesondere für die Inertailimpaktion größerer Flugaschepartikel [11]. Dazu wurden in vier Berechnungen jeweils der Partikeldurchmesser der Rohkohle konstant gehalten. Abbildung 11 zeigt, dass mit größer werdenden Partikeln die Depositionsrate progressiv zunimmt. Gleichzeitig verringert sich der Ausbrand, da die Verweilzeit für alle Partikel in etwa dieselbe ist, aber die Abbranddauer größerer Partikel stark zunimmt. Dementsprechend kommt der Vorhersage des Partikeldurchmessers auf seinem Weg durch den Kraftwerkskessel große Bedeutung zu.





Abbildung 9: Gitterausschnitt um die Keramiksonde

Abbildung 10: Netzunabhängigkeitsstudie



Abbildung 11: Einfluss des Partikeldurchmessers

5.5.2 Entwicklung eines Fragmentationsmodelles

In der Literatur ist häufig über das Phänomen der Fragmentation während des heterogenen Koksabbrandes zu lesen. Dabei kann es bei hohem Partikelausbrand zu einem auseinanderbrechen der porösen Struktur kommen [22]. Viele Kohlen, insbesondere Steinkohlen, durchlaufen während der Pyrolyse einen Schwellvorgang bei dem Cenosphären entstehen. Gerade beim Abbrand dieser Hohlkugeln brechen die dünnwandigen Partikel auseinander und es entstehen je nach Brennstoff und Ausbrand mehrere Fragmente. In der Literatur sind hierzu unterschiedlichste Werte, sowohl für den Zeitpunkt der Fragmentation als auch für die Anzahl der entstehenden Partikel zu finden. Abbildung 12 zeigt die Partikelgrößenverteilung, die in der ersten Messkampagne im Kraftwerk an verschiedenen Stellen gemessen wurde, sowie einen Vergleich mit berechneten Größen. Dabei wurde die Partikelgrößenverteilung nach der Kohlemühle, am Ende des Strahlungsteils auf



Ebene 34 m sowie dem Elektrofilter (Tagesmischprobe) ermittelt. Da der Durchmesser entlang des Rauchgaspfades abnimmt, verschiebt sich die Partikelgrößenverteilung mit zunehmendem Ausbrand nach links. Vergleicht man die gemessene Partikelgrößenverteilung im Filter mit einer Berechnung, bei der die Annahme vollständiger Koaleszenz zugrunde gelegt wird, so zeigt sich, dass der theoretische Durchmesser deutlich kleiner ist, was auf Cenosphären oder unvollständigen Ausbrand bei 34 m schließen lässt. Darüber hinaus sind Fragmentationsvorgänge bis zum E-Filter deutlich zu erkennen, da die Größenverteilung hin zu kleineren Durchmessern verschoben ist.



Abbildung 12: Vergleich der Partikelgrößenverteilung (mit Messdaten des IFK)

Diese und weitere in der Literatur zu findende Beobachtungen zu Fragmentation deuten an, dass ein Auseinanderbrechen der Partikel stattfindet. Da der Partikeldurchmesser einer der Schlüsselparameter für Verschlackungen ist, wurde ein Modell zur statistischen Beschreibung solcher Vorgänge entwickelt [2]. Dabei wird an definierter Stelle, z.B. bei einem Partikelausbrand von 85% bezogen auf den Kohlenstoffgehalt, das Partikel aus der Berechnung entfernt und an gleicher Stelle beliebig viele, neue Partikel injiziert und jeweils ein kleiner Impuls senkrecht zur Flugbahn aufgeprägt. Hierzu wird zumeist eine Anzahl von neu entstehenden Partikeln zwischen zwei bis zehn gewählt. Um die im Graphen der Abbildung 12 gezeigte Partikelgrößenverteilung der Filterasche zu treffen, ist eine Anzahl von fünf Fragmenten nötig, was sich gut mit Literaturwerten für Steinkohle deckt [22].





Abbildung 13: Partikelfragmentation

Der Vorgang des Auseinanderbrechens ist in Abbildung 13 graphisch illustriert. Der Einfluss der nun kleineren Partikel auf die Depositionsrate ist in den Ergebnissen deutlich erkennbar. Durch das Auseinanderbrechen reduziert sich, je nach Anzahl der entstehenden Fragmente, der Depositionsmassenstrom um fast eine Größenordnung. Für nähere Informationen ist auf die im Rahmen des Projektes entstandene Veröffentlichung verwiesen [2].

5.5.3 Entwicklung eines Modells zur Vorhersage von Depositionen und deren Eigenschaften

Darüber hinaus wurde ein Modell zur Beschreibung der zeitlichen Entwicklung, sprich dem Depositionsaufbau, entwickelt (siehe hierzu Masterarbeit D.Meinel). Ein Ablaufplan der nötigen Schritte ist in Abbildung 14 aufgezeigt.



Abbildung 14: Ablaufplan zur Berechnung der Depositionsschichtdicke



Zunächst wird die Partikelimpaktionsrate berechnet, bei der, wie schon erwähnt, die Anzahl der Knoten gerade in der Grenzschicht der zylindrischen Sonde eine entscheidende Rolle spielen. Ein eigens entwickeltes Haftkriterium (siehe Abschnitt 5.4) entscheidet anschließend, welche Partikel auf der Sonde haften bleiben und zum Depositionsaufbau beitragen. Im nächsten Schritt wird nun für jede Oberflächenzelle der Depositionssonde eine, dem auftreffenden Massenstrom entsprechende, Schichtdicke für den Zeitraum berechnet. Dabei werden die Eigenschaften der sich ablagernden Aschepartikel bzw. Schlacke benötigt. Diese werden in einem Unterprogramm berechnet. Zu den berechneten Größen zählen der Sintergrad (Modell nach Mackenzie und Shuttleworth 1949 [23] und Senior und Srinivasachar 1997 [24]), die effektive Wärmeleitfähigkeit (Modell nach Brailsford und Maior 1964 [25]) sowie die Viskosität (nach Senior et al. 1995 [26]) der sich bildenden Schicht. Ein weiterer wichtiger Parameter ist die Initialporosität der jeweiligen Schicht, die aus REM-Aufnahmen mittels graphischer Auswertung ermittelt werden kann. Dabei ist zu erwähnen, dass eine Vielzahl von weiteren, in der Literatur zu findenden. Modellen untersucht wurde. Ist die Schichtdicke bekannt, wird der nächstliegende Knoten gesucht und um den Betrag der sich ablagernden Schlackeschicht in radialer Richtung verschoben. Weiterhin wird der darunterliegenden Zelle die berechnete Wärmeleitfähigkeit der Schlacke aufgeprägt. Anschließend kann das, um die Ablagerung verformte Netz, benutzt werden, um die sich neu einstellende Depositionsrate zu berechnen. Die dargestellten Schritte können nun beliebig oft wiederholt werden, um den Depositionsaufbau abzubilden. Durch dieses Vorgehen können folgende wichtige Effekte berücksichtigt werden:

- Durch die isolierend wirkende Depositionsschicht verändern sich die Oberflächentemperaturen
- Veränderte Oberflächentemperaturen haben einen großen Einfluss auf die Klebrigkeit der Depositionsschicht und verstärken die Haftneigung von antreffenden Partikeln
- Die Strömung um den deformierten Zylinder ändert sich und kann berücksichtigt werden

Bilder für den zeitlichen Aufbau aus der Simulation sind in Abbildung 15 dargestellt. Dabei kann die Schichtzunahme durch verschobene Knoten über dem Umfang nachvollzogen werden.



Abbildung 15: Depositionsaufbau (Simulation)



5.5.4 Entwicklung eines Feinstaubmodelles

Für die Feinstaubsimulation wurde ebenfalls ein Modell entwickelt. Es nutzt neben Strömungs- und Partikelparametern aus der CFD-Simulation auch Daten aus Gleichgewichtsrechnungen mit FactSage. Hierfür wurde mit SimuSage eine Stand-Alone-Applikation entwickelt, um die Freisetzung von Aschespezies und die Sättigungskonzentration zu berechnen. Die Reaktivität der Aschekomponenten stammt aus der chemischen Fraktionierung, beschrieben in Abschnitt 5.1.3. Dadurch kann die Übersättigung der Spezies i berechnet werden. Mit diesen Eingangsdaten und Modellen zur homogenen und heterogenen Kondensation können dann Keimbildungsraten und Wachstumsraten von Partikeln bestimmt werden (bspw. [27] und [28]). Die Populationsbilanz (Abbildung 16) kann dabei zu jedem Zeitpunkt ausgegeben werden. Eine weitere Dimension des Modells ist die mittlere oxidische Zusammensetzung der Größenklassen (Abbildung 17). Die beiden Abbildungen zeigen die Partikelgrößeverteilung und Zusammensetzung bei einer Verweilzeit des Partikels von 0,31 s im Flugstromreaktor.



Abbildung 16: Partikelgrößenverteilung durch Kondensation

Abbildung 17: Oxidische Zusammensetzung der Größenklassen

Im Rahmen des Projektes wurden Experimente im Labormaßstab zum Verschlackungsverhalten von vier Steinkohlen durchgeführt. Mit den daraus gewonnenen Ergebnissen wurden Modelle zur Partikel-Fragmentation, der Feinstaubentstehung, der Haftwahrscheinlichkeit und der physikalischen Eigenschaften von Depositionen entwickelt (Sintern, Porosität, Wärmeleitung). Die entwickelten Modelle wurden in CFD-Simulationen des Flugstromreaktors eingebunden. Die Implementierung auf die Simulationen des Großkessels wurde vom IFK durchgeführt.



Es wurde durch die Abbildung des Sinterverhaltens ein direkter Zusammenhang zwischen Depositionshöhe (aus der optischen Messtechnik) und dem Gewicht (aus der CFD-Simulation) hergestellt. Dadurch steht eine online Möglichkeit des Abgleichs zwischen Simulation und Experiment zur Verfügung, die auch Erosion und Abtragsraten identifizieren kann.

Die Modelle sind vielversprechend. Eine weitere Validierung der Modelle erscheint jedoch notwendig. Basierend auf den Erkenntnissen sind weitere Publikationen in naher Zukunft geplant. Die Depositionskriterien mit FactSage bzw. TGA/DTA Analysen haben deutliche Vorteile gegenüber anderen Mess- und Analyseverfahren und sollten in Zukunft weiter untersucht werden. Das Fragmentationsmodell zeichnet sich durch geringen zusätzlichen Rechenaufwand aus, muss aber noch mit weiteren experimentellen Versuchen validiert werden. Alle betrachteten Steinkohlen waren aluminium- und siliziumreich. Es wäre zudem noch notwendig die Modelle auch mit Steinkohlen durchzuführen deren Zusammensetzung deutliche Unterschiede aufweist.

6 Wesentliche terminliche und inhaltliche Abweichungen zum Projektantrag

Der ursprünglich verfolgte Bottom-Up Ansatz, eine Reduktion der Brennstoffanzahl hin zur größeren Versuchsanlage, konnte nicht umgesetzt werden. Grund hierfür war, dass auf die Kohlesorte im Kraftwerk kein Einfluss genommen werden konnte. Daher wurden die Versuche im Flugstromreaktor erst im Anschluss an die Messkampagne durchgeführt.

Die Vergleichsversuche mit Braunkohle sind noch nicht durchgeführt worden. Die Versuche werden im Laufe des Dezembers 2012 abgeschlossen.

Die Emissivitäten von Kohleaschen wurden im Projekt nur für eine Braunkohle untersucht, da hier Literaturwerte vorhanden waren. Diese Literaturwerte konnten jedoch nicht reproduziert werden. Aufgrund des geringen Nutzens für die Simulation von Versuchsanlagen wurde dieser Parameter nicht weiter untersucht.

Der Projektabschluss bis zum 31.12.2012 ist gegeben.

7 Publikationen und Patente

7.1 Im Rahmen des Projektes entstandene Publikationen

7.1.1 Begutachtete Publikationen

- Wieland, C. et al.: Evaluation, comparison and validation of deposition criteria for numerical simulation of slagging. Applied Energy (2012), Vol. 93, S. 184–192
- [2] Kreutzkam, B. et al.: Improved numerical prediction of ash formation and deposition using a novel developed char fragmentation model. Fuel (2012), Vol. 98, S. 103–110



7.1.2 Nicht-begutachtete Publikationen

- [3] Kreutzkam, B. et al.: Calculation of the ash formation during pulverised coal combustion using a novel code to improve deposition prediction in utility boilers. Impact of Fuel Quality (2010), Saarisälka, Finnland
- [4] Wieland, C. et al.: Evaluation, comparison and validation of deposition criteria for numerical simulation of slagging. 36th International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems (2011), Clearwater, USA
- [5] Wieland, C. et al.: Vergleichende Untersuchung von Depositionskriterien für CFD-Simulationen. 25. Deutscher Flammentag Verbrennung und Feuerung (2011), Karlsruhe, Germany
- Kleinhans, U. et al.: Vorhersage von Depositionseigenschaften und deren zeitlicher Aufbau (Posterpräsentation). 44. Kraftwerkstechnische Kolloquium (2012), Dresden, Germany
- [7] Wieland, C. et al.: Zwischenbericht KW21 BY04DE. Technische Universität München (2011), München, Germany
- [8] Kleinhans, U. et al.: Modeling ash deposition and formation during pulverized fuel combustion using Computational Fluid Dynamics. 38th International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems (2013), Clearwater, USA

7.2 Gemeinsame Publikationen zweier oder mehrerer KW21 Teilprojekte

Keine.

7.3 Weitere Publikationen

- [9] Greißl, O.; Käß, M.: Aktuelle und zukünftige Herausforderungen beim Betrieb konventioneller Kraftwerke. Vortrag KW21 DE Workshop 18.11.2010 (2010)
- [10] Bryers, R.W.: Factors critically affecting fireside deposits in steam generators. Impact of Mineral Impurities in Solid Fuel Combustion (1999), S. 105-132
- [11] Effenberger, H.: Dampferzeugung. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (2000)
- [12] Couch, G.: Understanding Slagging and Fouling During Pf Combustion. IEA Coal research (1994)
- [13] DIN 51719: Bestimmung des Aschegehaltes. Beuth Verlag (1997)
- [14] DIN 51900-1: Prüfung fester und flüssiger Brennstoffe Bestimmung des Brennwertes mit dem Bomben-Kalorimeter und Berechnung des Heizwertes. Beuth Verlag (2000)
- [15] DIN 51718: Bestimmung des Wassergehaltes. Beuth Verlag (2002)
- [16] DIN 51730: Bestimmung des Ascheschmelzverhaltens. Beuth Verlag (2007)
- [17] Tortosa Masiá, A. et al.: Characterising ash of biomass and waste. Fuel Processing Technology (2007), Vol. 88, S. 1071-1081



- [18] Mayoral et al.: Different approaches to proximate analysis by thermogravimetry analysis. Thermochimica Acta (2001), Vol. 370, S. 91-97
- [19] Bohnes, S. et al.: Spectral emissivity measurements of single mineral phases and ash deposits. ASME Summer Heat Trasnfer Conference (2005)
- [20] Bryers, R.: Fireside slagging, fouling, and high-temperature corrosion of heattransfer surface due to impurities in steam-raising fuels. Prog. Energy and Comb. Sci. (1995), Vol. 22, S. 29-120
- [21] Huang, L.Y. et al.: Prediction of ash deposition on superheater tubes from pulverized coal combustion. Fuel (1996), Vol. 75, S. 271 279;
- [22] Weber, R. et al.: On predicting the ash behavior using Computational Fluid Dynamics. Fuel Processing Technology. (2013), Vol. 105, S. 113-128
- [23] Baxter, L.L.: Char fragmentation and fly ash formation during pulverized-coal combustion. Combustion and Flame (1992), Vol. 90, S. 174-184
- [24] Mackenzie, J.K. und Shuttleworth, R.: A phenomenological theory of sintering. Proceedings in Physics. (1949), Vol. 62, S. 833-852
- [25] Senior, C.L.: Predicting removal of coal ash depositis in convective heat exchangers. Energy and Fuels (1997), Vol. 9, S. 416-420
- [26] Brailsford, A.D. und Major, K.G.: The thermal conductivity of aggregates of several phases including porous media. British Journal of Applied Physics. (1964), Vol. 15, S. 313-319
- [27] Senior, C.L. und Srinivasachar, S.: Viscosity of ash particles in combustion systems for prediction of particle sticking. Energy and Fuels (1995), Vol. 9, S. 277-283
- [28] Friedlander, S.: Smoke, Dust, and Haze. Oxford University Press (2000)
- [29] Jokiniemi, J.: Numerical Simulation of vapour-aerosol dynamics in combustion processes. Journal of Aerosol Science (1994), Vol. 25, S. 429-446

7.4 Im Rahmen des Projektes entstandene Patente

Es sind keine Patente entstanden.

8 Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses

8.1 Studentische Mitarbeiter

- R. Graf Optimierung der Steuerung des Flugstromreaktors
- R. Maier Entwicklung einer Brennstoffdatenbank in Access
- D. Meinel Unterstützung der Messkampagne im Heizkraftwerk Altbach



8.2 Studien-, Semester- und Bachelorarbeiten

M. Ehrmann	Erweiterung des Flugstromreaktors um eine Konvektionszone und Linearführungseinheit
S. Fromm	Sensitivitätsanalyse für die numerische Simulation von Kohle- staubverbrennung
T. Geisberger	Konstruktion einer Partikelprobennahmesonde
P. Kloibhofer	Konstruktion einer gekühlten Depositionssonde
R. Maier	Numerische Modellierung der Feinstaubbildung bei der Kohle- verbrennung
S. Pradel	Entwicklung und Implementierung einer Datenerfassung für einen Emissionsmessschrank
M. Schneider	Thermogravimetrische Untersuchungen zur Verbrennungskinetik von Festbrennstoffen
M. Weber	Modellierung der Partikelablagerungen auf quer angeströmten Rohren mittels CFD
E. Suttor	Untersuchung des Verbrennungsverhaltens fester Brennstoffe an einem Drahtnetzreaktor
M. Graf	Modellierung und Auslegung eines Brenners zur Feststoff- verbrennung im Flugstromreaktor mittels CFD
U. Merschbecker	Detaillierte Strömungssimulation der Brennstoffzuführung eines Flugstromreaktors
C. Barfuß	Implementierung eines Reaktionsmechanismus in ein CFD-Modell
F. Sohaib Zafar	Evaluation of slagging and fouling propensities using indices

8.3 Diplom- und Masterarbeiten

A. Hoyningen-Huene	CFD-Simulation eines atmosphärischen Flugstromreaktors
L. Jasserand	Modellierung eines Kraftwerkskessels
O. Knapp	Modellierung des Verbrennungsprozesses am Flugstromreaktor für verschiedene Biomassen
D. Meinel	Vergleich und Simulation von Depositionsverhalten und Sinter- prozessen bei Verschlackungen
J. Sun	Konstruktion einer gekühlten Depositionssonde und optischen Depositionsratenmessung

8.4 Promotionen

B. Kreutzkam (in 2013) Analyse des Depositionsaufbaus bei staubförmiger Kohleverbrennung unter Benutzung eines neu entwickelten Fragmentationsmodells

9 Forschungsprogramme des Bundes und der EU

9.1 Angaben, ob weitere Drittmittel zum Projektthema eingeworben wurden, insbesondere aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen des Bundes und der EU

BMWi	Cooretec: Kohlevergasung unter hohen Drücken und Temperaturen
BMWi	Exist: Niedertemperaturabwärmenutzung mittel ORC
EU	FP7: Analyse der Teerzusammensetung von Biomassen bei der Vergasung
EU	RFCS: Entwicklung von online Sensoren zur Verschlackung und Verschmutzung in Kraftwerken

9.2 Geplante Antragsstellung bzw. künftige Förderung aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen von Bund, EU etc. sowie allgemeinen Förderprogrammen (z.B. DFG)

Keine.



Arbeitskreis Kraftwerkssysteme und Dampferzeuger

Projekt: BY 5DE

Modellierung des dynamischen Verhaltens von 700 °C-Kraftwerken

Projektleiter:	Prof. DrIng. Hartmut Spliethoff Lehrstuhl für Energiesysteme Technische Universität München
Mitarbeiter:	DiplIng. (FH) Christian Schuhbauer, M.Sc.
Finanzierung:	E.ON Energie AG ALSTOM Boiler Deutschland GmbH
	Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst
	Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie

1 Ausgangssituation

Derzeit werden mehr als 30 % des weltweiten Strombedarfs durch kohlegefeuerte Dampfkraftwerke gedeckt. In Deutschland belief sich der Anteil 2010 auf 42,6 % [7]. Der mittlere Nettowirkungsgrad der bestehenden Kraftwerksflotte beläuft sich auf circa 38 % (Deutschland/Europa) und 30 % (weltweit). Vor dem Hintergrund des voranschreitenden Klimawandels geraten Kohlekraftwerke wegen ihres hohen spezifischen CO_2 - Ausstoßes zunehmend in Kritik. Allerdings sind sie wegen ihrer hohen Wirtschaftlichkeit gerade für Schwellenländer, die mit stark steigender Stromnachfrage zu kämpfen haben, weiter eine attraktive Lösung. China allein verfügt über 30 % der weltweiten Kohlereserven und wird auch in Zukunft massiv Kohlekraftwerksleistung zubauen. Verglichen mit den Preisentwicklungen von Rohöl und Gas ist die Preissteigerung von Kohle moderat. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass im Gegensatz zu Rohöl oder Gas die weltweiten Kohlevorkommen nicht nur auf Krisengebiete beschränkt sind, sondern auf viele Länder verteilt sind. Die momentane statistische Reichweite beläuft sich auf 169 Jahre [6]. Somit ist Kohle, verglichen mit anderen fossilen Ressourcen, der Energieträger mit der längsten Verfügbarkeit.

Politische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen veränderten den Energiemarkt in Deutschland in den letzten Jahren gravierend. Neben der Liberalisierung der Märkte, wodurch die Wertschöpfungskette aufgeteilt wurde, hat insbesondere die Förderung Erneuerbarer Energien durch das EEG die Strukturen der Energieerzeugung verändert. Aufgrund dessen Einführung stieg beispielsweise der Bau von Windkraftanlagen deutlich an,



deren installierte Nennleistung belief sich in Deutschland im Jahr 2011 auf 28.818 MW [8]. Da Windaufkommen schwer zu prognostizieren sind, ergeben sich deutlich höhere Anforderungen an Flexibilität und Dynamik des üblichen Kraftwerkparks. Nicht nur die dafür konzipierten Spitzenlastkraftwerke sondern auch die in der Mittellast betriebenen Anlagen müssen hierzu ihren Beitrag leisten. Folglich muss auch den Auswirkungen von dynamischen Vorgängen im Steinkohlekraftwerk besondere Beachtung geschenkt werden. Während derzeit Steinkohleblöcke, die dem Stand der Technik entsprechen, einen Nettowirkungsgrad von rund 46 % erreichen, sollen die Kraftwerke der neuen Generation künftig die Grenze der 50 % durchbrechen. Um diese Effizienzsteigerung zu erreichen müssen neben zahlreichen Optimierungen - die Dampfparameter statt der üblichen 600 °C und 280 bar auf über 700 °C und 365 bar gesteigert werden. Der Betrieb dieser Hochtemperaturanlagen weist aufgrund der genannten Dampfparameter künftig eine deutlich höhere mechanische sowie thermische Bauteilbeanspruchung auf. Diese höheren Beanspruchungen und die oben genannte Verbesserung der Dynamik machen einen Wechsel von den Eisen-Kohlenstoffstählen auf die Nickelbasislegierungen im Bereich höchster Temperaturen unumgänglich.

2 Projektziele

An die Dynamik von Hochtemperaturkraftwerken sind ähnlich hohe Anforderungen zu stellen wie an die von konventionellen Kraftwerken. Hochtemperaturanlagen weisen jedoch aufgrund von höchsten Dampfparametern eine deutlich größere Bauteilbeanspruchung auf, so dass den Auswirkungen von dynamischen Vorgängen besondere Beachtung geschenkt werden muss. Durch Simulation kann die Beanspruchung an kritischen Komponenten für bestimmte Lastwechselvorgänge ermittelt werden und mit Kenntnis der charakteristischen Werkstoffkennwerte der Einfluss auf Ermüdung und Zeitstandbeanspruchung dieser Bauteile bewertet werden. Im Folgenden werden kurz die Arbeitspakete aufgelistet:

- AP1: Modellierung des 700 °C-Kraftwerkskonzepts in APROS
- AP2: Modellierung von Beheizungsschieflagen und dampfseitiger Mehrsträngigkeit
- AP3: Modellierung von Heizflächenverschmutzung
- AP4: Werkstoffanalyse, Bestimmung von Materialkosten, Zeitstandfestigkeit und Wöhlerlinien
- AP5: Erweiterung des Modells zur Simulation der Erschöpfung der kritischen Bauteile
- AP6: Wirtschaftliche Optimierung des Anlagenbetriebs

2.1 Umsetzung der Hinweise aus den bisherigen Begutachtungen

Die Anregungen aus der Begutachtung wurden wie folgt umgesetzt:

- Basis der gekoppelten Simulation waren Arbeiten der Universität Stuttgart, wo bereits ein ähnlicher Algorithmus eingesetzt wird.
- Es wurden Veröffentlichungen publiziert, derzeit sind noch Veröffentlichungen anhängig.
- Das Aprosmodell konnte auf das 6-Gleichungsmodell umgestellt werden wodurch das Auskühlmodell besser funktioniert und auch Kaltstarts möglich sind.



3 Vernetzung

3.1 Vernetzung innerhalb KW21

Innerhalb KW21 wird intensiv mit den Teilprojekten BY4DE (Verschlackung) und BY6DE (Müllverbrennung) zusammengearbeitet. Die Vernetzung mit dem Teilprojekt BY4DE besteht darin, dass die Verschmutzungsproblematik einen erheblichen Einfluss auf das Wärmeübergangsverhalten sowohl im Strahlraum als auch im konvektiven Teil hat. Hierzu liefert auch das Teilprojekt BY6DE seinen Anteil, um das CFD-Modell mit den dazugehörigen Vereinfachungen so zu gestalten, dass die Realität möglichst genau abgebildet werden kann.

3.2 Vernetzung außerhalb KW21

Außerhalb KW21 werden vom MPA Stuttgart und MPA Darmstadt Materialdaten geliefert, so dass es möglich ist sowohl, für Zeitstandverhalten als auch für Ermüdung Korrelationen für die neuentwickelten Nickelbasislegierungen A617mod und A263 zu generieren. Diese werden wiederum mittels C-Code in die instationäre Simulation implementiert.

4 Vorgehensweise und Methodik

Die Grundlage für die dynamische Simulation liefert das Modell des Kraftwerks Zolling aus der KW21 Phase I. Dieses wird entsprechend umgebaut zum 700°C-Steinkohlekraftwerk. Weiter werden die Regelungen substituiert, erweitert bzw. verbessert, sodass die geforderten Anforderungen eingehalten werden können (AP1). Zudem wird ein C-Code generiert mit dem online, also für jeden Zeitschritt, die auftretende Schädigung (Ermüdung und Kriechen) dickwandiger Bauteile berechnet wird (AP5). Hierzu ist es notwendig, anhand von Werkstoffdaten (Zeitstandfestigkeit und Wöhlerlinien) Korrelationen zu formen, die das Werkstoffverhalten abbilden (AP3). Weiterhin wird ein Modell entwickelt, in dem die Dampfseite mehrsträngig abbildet wird (APROS) und die Feuerung mittels CFD (Ansys Fluent) simuliert wird. Beide Simulationen werden mit Matlab gekoppelt, sodass Einflüsse von Beheizungsschieflagen und Verschmutzung bewertet werden können (AP2 und AP3). Um den wirtschaftlichen Anlagenbetrieb bewerten zu können, werden Primär- und Sekundärregelung in Hinblick auf deren Dynamik untersucht (AP6).

5 Projektergebnisse und Ausblick

Im Folgenden werden die Ergebnisse vorgestellt. Die Schädigung der Sammler durch Anund Abfahrvorgänge wird aufgezeigt und die Dynamik der Primär- und Sekundärregelfähigkeit untersucht. Diese Untersuchungen werden mit dem einsträngigen Aprosmodell durchgeführt. Der zweite Teil der Ergebnisse beruht auf dem mehrsträngigen Kopplungsmodell, welches die Einflüsse von Verschmutzung und Beheizungsschieflagen untersucht.



5.1 Schädigung durch An- und Abfahren

Als kritische Bauteile für die Untersuchung werden die Ein- und Austrittssammler der Überhitzer 3 und 4 gewählt (SH3ein, SH3aus, SH4ein und SH4aus), da hier sehr hohe Drücke mit höchsten Temperaturen auf dickwandige Bauteile wirken. Untersucht worden sind Heiß-, Warm- und Kaltstart nach jeweils 8 h, 48 h bzw. 72 h Stillstand.



Abbildung 1: Simulationsergebnisse beim Kaltstart nach 72 h Stillstand



Abbildung 2: Spannungsverläufe im Frischdampfsammler SH4aus beim Kaltstart



Original	Geometrie	(Spannun	g in MPa, Te	emperatu	ır in °C)				
					Heißsta	rt			
	sigma	sigma	delta						
	min	max	sigma	Tmin	Tmax	Tref	Ermüdung	Kriechen	Gesamt
SH3ein	21	350	329	432	517	496	9,9E-07	7,7E-06	8,7E-06
SH3aus	-173	190	363	510	617	590	3,6E-06	8,3E-06	1,2E-05
SH4ein	-61	264	325	439	578	543	1,1E-06	9,3E-06	1,0E-05
SH4aus	-251	228	480	473	650	606	2,1E-05	1,1E-05	3,2E-05
					Warmsta	art			
	sigma	sigma	delta						
	min	max	sigma	Tmin	Tmax	Tref	Ermüdung	Kriechen	Gesamt
SH3ein	-79	275	354	310	553	492	1,8E-06	1,0E-05	1,2E-05
SH3aus	-205	186	391	340	647	570	5,4E-06	1,0E-05	1,6E-05
SH4ein	-63	262	325	295	626	543	1,1E-06	1,1E-05	1,2E-05
SH4aus	-159	233	391	251	711	596	2,2E-06	1,1E-05	1,3E-05
					Kaltsta	rt			
	sigma	sigma	delta						
	min	max	sigma	Tmin	Tmax	Tref	Ermüdung	Kriechen	Gesamt
SH3ein	-74	271	345	198	583	486	1,4E-06	1,1E-05	1,2E-05
SH3aus	-182	190	373	168	650	529	3,1E-06	1,1E-05	1,4E-05
SH4ein	-112	262	374	158	641	520	3,1E-06	1,2E-05	1,6E-05
SH4aus	-190	233	424	274	708	599	5,1E-06	1,2E-05	1,7E-05
Geänder	te Geomet	rie (Spann	ung in MPa,	Tempera	atur in °C	;)			
					Heißsta	rt			
	sigma	sigma	delta						
	min	max	sigma	Tmin	Tmax	Tref	Ermüdung	Kriechen	Gesamt
SH3ein	49	347	299	428	514	493	4,4E-07	8,9E-06	9,3E-06
SH3aus	5	352	347	415	609	561	1,9E-06	1,5E-05	1,7E-05
SH4ein	13	354	341	440	551	523	1,5E-06	1,2E-05	1,4E-05
SH4aus	-174	349	522	458	641	595	8,7E-05	1,8E-05	1,0E-04
					Warmsta	art			
	sigma	sigma	delta						
	min	max	sigma	Tmin	Tmax	Tref	Ermüdung	Kriechen	Gesamt
SH3ein	-38	348	386	302	535	476	3,4E-06	1,2E-05	1,5E-05
SH3aus	-90	350	441	168	626	512	2,7E-05	1,7E-05	4,4E-05
SH4ein	-25	352	377	180	619	510	3,2E-06	1,5E-05	1,8E-05
SH4aus	-83	350	434	248	702	589	7,3E-06	1,7E-05	2,5E-05
					Kaltsta	rt			
	sigma	sigma	delta						
	min	max	sigma	Tmin	Tmax	Tref	Ermüdung	Kriechen	Gesamt
SH3ein	-78	347	424	157	545	448	1,0E-05	1,3E-05	2,2E-05
SH3aus	-65	350	415	140	629	506	9,8E-06	1,8E-05	2,8E-05
SH4ein	-64	352	416	152	623	506	1,0E-05	1,6E-05	2,6E-05
SH4aus	-99	350	450	254	711	597	1,1E-05	1,9E-05	3,0E-05

Tabelle 1: Ergebnisse der Schädigungsberechnung durch den An- und Abfahrzyklus



Exemplarisch sind in Abbildung 1 die Ergebnisse des Verlaufs von Frischdampf- und Zwischenüberhitzertemperatur, Frischdampfmassenstrom, Frischdampfdruck und der Leistungsverlauf beim Kaltstart dargestellt. Bei einem zulässigen Temperaturgradienten von 4 K/min wird das Kraftwerk angefahren, bis die Turbine synchronisiert wird. In diesem Zeitraum werden die Feuerungsleistung und die Temperatur konstant gehalten (hier 450°C). Anschließend wird mit einem geringeren Gradienten von 2K/min in den Volllastpunkt gefahren. Nach einer Stunde in Volllast wird das Kraftwerk abgefahren. Den dazugehörigen Spannungsverlauf von thermischer und mechanischer Lochrandspannung sowie mechanischer Lochrandspannung für die Bewertung der Kriechschädigung (ZF) zeigt Abbildung 2. Weiter werden die Sammler auf eine geringere Lebensdauer ausgelegt, so dass Material gespart werden kann, wodurch Kosten reduziert werden (siehe Tabelle 2).

	SH3ein	SH3aus	SH4ein	SH4aus
Wanddickenreduktion	13 mm	38 mm	15 mm	21 mm

Tabelle 2: Wanddickenreduktion durch Neuauslegung

Die Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse für die jeweiligen Zyklen. Die Kriechschädigung nimmt vom Heißstart zum Kaltstart hin zu. Bei den geänderten Geometrien ist die Zeitstandschädigung aufgrund der geringeren Wandstärke höher. Die Ermüdungsschädigungen sind beim Kaltstart tendenziell höher als beim Warmstart. Allerdings treten beim Heißstart die höchsten Spannungsschwingbreiten auf (480 MPa im Originalfall und 522 MPa im geänderten Fall), weil beim Anfahren die Temperatur im Überhitzer erst abgekühlt wird durch den kühleren Dampf aus der Wasserflasche, wodurch betragsmäßig höhere Druckspannungen resultieren. Das kritischste Bauteil ist der Frischdampfsammler. Das Vorgehen zur Berechnung der Schädigung ist in [2], [4] und [5] beschrieben.

5.2 Primärregelung

Bei der Primärreglung wird das Potential des Kondensatstops in Verbindung mit Aufhebung der Turbinenventilandrosselung untersucht. Betrachtet werden die Reserven bei 530 MW und 230 MW Last. Beim Kondensatstopverfahren werden die Anzapfmassenströme der MD- und ND-Turbine reduziert, sodass die Leistung der Turbine durch den erhöhten Massenstrom zunimmt. Hier wird die indirekte Methode angewandt, bei der die Anzapfmassenströme aufgrund des ansteigenden Gegendrucks - Drosselung der Kondensatpumpen - der Vorwärmerkondensatoren sukzessive abnehmen. Bei der direkten Methode werden die Anzapfventile direkt geschlossen, so dass ein höherer Leistungsgewinn über kürzere Dauer möglich ist. Für die genannten Lasten wurden je zwei Frequenzabweichungen von 5 und 15 mHz untersucht. In allen Fällen konnte das Kraftwerk den Anforderungen der Sollleistung über 15 min. gerecht werden. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 3. Der erste Peak in Abbildung 3 rührt aus der Öffnung des angedrosselten Turbinenventils. Durch den Druckabfall wird innerhalb weniger Minuten der Dampfmassenstrom reduziert. Durch den indirekten Kondensatstop wird der Leistungsabfall abgefangen. Auf die Temperaturen des Frischdampfes und der heißen Zwischenüberhitzung hat dieses Verfahren nahezu keinen Einfluss [1], [9], [10], [11].





Abbildung 3: Ergebnisse des Kondensatstopverfahrens

5.3 Sekundärregelung

Hier werden unterschiedliche Lastwechsel bezüglich ihrer Dynamik untersucht. Der Fokus liegt darauf, die thermischen Spannungen in einem annehmbaren Maß zu halten. Es wurden fünf verschiedene Lastwechsel untersucht:

40 %-100 %-40 %	50 %-80 %-50 %	90 %-100 %-90 %
	40 %-60 %-40 %	70 %-90 %-70 %

Der Startpunkt wird 30 Minuten gehalten. Anschließend folgt die Laständerung in positiver Richtung. Der Maximalwert wird eine Stunde gehalten und abschließend wird in den Ausgangszustand zurückgefahren. Zur Beurteilung der Dynamik wurde die 90 %-Methode herangezogen [12]. In der Abbildung 4 ist exemplarisch der größte Lastwechsel dargestellt. Für den Verlauf der Sollleistung wird aus regelungstechnischer Sicht ein maximaler Sprung von 110 MW zugelassen. Aus dem Sollleistungsverlauf wird der Modellleistungsverlauf berechnet, dem die Istleistung entsprechend folgt. Die Tabelle 3 zeigt die wichtigsten Ergebnisse aus der Lastwechselanalyse. Die maximale Temperaturabweichung des Frischdampfes tritt beim größten Lastwechsel mit 16 K auf. Durch eine weitere Anpassung der Regelgüte sollte dieser Wert noch verringert werden können. Entsprechend treten bei diesem Lastwechsel die maximalen Spannungen im Frischdampfsammler auf. Diese beträgt 214 MPa und hat somit kaum Einfluss auf die Ermüdungsschädigung. Die Lastwechselgeschwindigkeiten sind eher moderat. Im Maximum werden 6 %/min erreicht. Generell werden zu kleineren Lastwechseln hin auch die Geschwindigkeiten niedriger, da die Trägheiten der Mühle und des Dampferzeugers mehr zum Tragen kommen.





Abbildung 4: Dynamik des Lastwechsels 40 %-100 %-40 %

Load changes	Max. +	Max	dP/dt+ 90%	dP/dt- 90%	dP/dt+ max.	dP/dt- max.
40-60-40	10.02	5.64	1.16	1.33	2.55	2.67
40-100-40	16.25	8.76	2.77	2.57	6.24	4.08
50-80-50	6.43	8.05	1.59	1.5	5.54	3.25
70-90-70	6.76	10.04	1.03	1.09	2.72	2.70
90-100-90	2.14	2.58	0.72	0.69	1.42	1.48

Tabelle 3:	Ergebnisse aus der	Lastwechselanalyse	(ΔT in K;	dP/dt in %/mi	n)
------------	--------------------	--------------------	-----------	---------------	----

5.4 Kopplungsalgorithmus

Da die Simulation von Dampfkreis und Feuerung in zwei verschiedenen Softwarepaketen erfolgt, müssen die Ergebnisse aus der einen Berechnung jeweils als Randbedingung auf die andere Simulation aufgeprägt werden. In diesem Fall wird als Schnittstelle Matlab gewählt. Die Randbedingungen für die Implementierung der Kopplung sind durch die Einund Ausgabemöglichkeiten der Programme vorgegeben. So kann die Ausgabe der Wandwärmeströme in Fluent nur über ein sogenanntes Profile erfolgen. Dabei wird der Wandwärmestrom zunächst mit Hilfe einer sogenannten custom-field-function aus der Wärmestromdichte und der Wandfläche für jede Zelle berechnet und dann zusammen mit den Koordinaten des Zellmittelpunktes in ein File geschrieben. Schwieriger gestaltet sich die Eingabe in Fluent, sie kann nur über das Einlesen von entsprechend formatierten . txt-Files erfolgen. Abbildung 5 zeigt das Prinzip der Kopplung. Wärmeströme werden aus Fluent exportiert und als Randbedingung in Apros aufgeprägt. Dort werden daraus die Rohrinnentemperaturen berechnet, die wiederum als Randbedingung in Fluent aufgeprägt werden [3].





Abbildung 5: Prinzipskizze der Kopplung

5.4.1 Kopplung Matlab-Apros

Die Kopplung zwischen Matlab und Apros gestaltet sich einfach, da aus Matlab heraus über einen OPC-Server direkt auf Apros-interne Variablen zugegriffen werden kann. Dabei werden zunächst die Wärmeströme, die zuvor aus Fluent eingelesen wurden, direkt in die zugehörigen Apros-Variablen geschrieben. In Apros bedeutet das, dass jedem Rohrabschnitt der für ihn in Fluent bestimmte Wärmestrom aufgeprägt wird. Dann wird über den OPC-Server die Apros-Berechnung gestartet. Nach 10 Minuten stoppt der OPC-Server die Berechnung wieder und liest direkt aus den entsprechenden Apros-Variablen die Rohrinnenwandtemperatur (Wasserdampfseite) am Anfang und Ende jedes Rohrstücks aus. Diese Temperaturen werden dann in Matlab weiter aufbereitet, so dass sie in Fluent aufgeprägt werden können. Abbildung 6 zeigt das Verfahrensprinzip [3].





5.4.2 Kopplung Matlab-Fluent

Die Fluent-seitige Kopplung gestaltet sich etwas komplexer, da es nicht die Möglichkeit gibt, von Matlab aus direkt auf Fluent-Variablen zuzugreifen. Deshalb müssen als Zwischenschritt .txt-Files verwendet werden, die jeweils in Matlab oder Fluent eingelesen werden und die auszutauschende Information enthalten. In Fluent selbst werden die Werte dann mit Hilfe einer udf (user-defined function) als Randbedingungen aufgeprägt. Das Prinzip der Kopplung ist in Abbildung 7 dargestellt.





Abbildung 7: Prinzipskizze Kopplung Matlab-Fluent

Fluent exportiert die Wandwärmeströme als Profile-File. In diesem File finden sich für jede Wandzelle die Koordinaten des Zellmittelpunktes, sowie der Wandwärmestrom, der durch die Wandfläche dieser Zelle den Berechnungsraum verlässt. Diese Daten werden in Matlab eingelesen und dort, anhand der Zellmittelpunkte geometrisch den vier Strängen zugewiesen. Jeder Punkt auf der Kesseloberfläche wird einem Strang zugeordnet. Anhand der Höhenkoordinate erfolgt dann die Zuweisung zu einem bestimmten Rohrabschnitt in Apros. Die Wärmeströme aller Zellen, die in diesem Rohrabschnitt liegen, werden addiert und die Summe wird als Wärmestrom an Apros übergeben. Die Wärmeströme aus den konvektiven Heizflächen werden mit Hilfe der udf in ein .txt-File geschrieben, allerdings erfolgt hier die Aufsummierung über den Zellen bereits innerhalb der udf, so dass Matlab den Wärmestrom nur einlesen und weitergeben muss. Für den Rückweg müssen die aus Apros erhaltenen Temperaturen aufbereitet werden, bevor sie in Fluent eingelesen werden können. Matlab erhält von Apros, pro diskretisiertem Rohrstück zwei Rohrinnenwandtemperaturen. Für die Membranwand werden die Temperaturen zwischen den Rohrenden linear gemittelt. Dann wird in Matlab die Temperatur für jede Zelle berechnet, dabei werden der Strang und der Rohrabschnitt, zu dem die Zelle gehört, berücksichtigt. Diese Werte werden zusammen mit den zughörigen Koordinaten des Zellmittelpunktes gespeichert (temperatures.txt). Dieses File wird von der udf eingelesen, die udf sucht anhand der Koordinaten die zugehörige Wandzelle und prägt die Temperatur auf der Rohrinnenseite auf. Die Berechnung der Temperatur auf der Rohraußenseite erfolgt in Fluent selbst. Im Konvektivteil erhält Matlab ebenfalls von Apros für jede Heizfläche zwei Temperaturen und gibt diese über temp conv.txt direkt an die udf weiter. In der udf ist dann eine Funktion hinterlegt, welche die Temperatur über die Rohrlänge mittelt. Dabei wird der tatsächliche Rohrverlauf berücksichtigt, also auch mehrfach umgebogene Rohre. Die Temperaturen werden zur Berechnung der Quellterme für die porösen Medien herangezogen [3]. Ähnliche Vorgehensweisen zur Kopplung von Dampfseite und Feuerung sind in [14] und [15] erläutert.

5.5 Validierung des Volllastfalls an der wärmetechnischen Auslegung

Da das 700 °C-Kraftwerk, noch nicht realisiert wurde, ist eine klassische Validierung anhand von Messwerten, wie in [13] empfohlen, nicht möglich. Als Anhaltspunkt kann der Vergleich mit Daten aus der thermischen Kesselauslegung von Alstom Boiler Deutschland herangezogen werden. Im Vollastfall sind nahezu alle Einstellungen aus der wärmetech-



nischen Auslegung für "normal verschmutzten Kessel" vorgegeben. Als einziger Freiheitsgrad bleibt die Verschmutzungsdicke, die "normaler Verschmutzung" entspricht. Diese wird im Brennkammerbereich solange variiert, bis sich etwa die in der Auslegung geforderten Wärmeströme einstellen. Die Verschmutzung der Kesselwände wird als homogen angenommen und beträgt 2,6 mm. Abbildung 8 liefert einen Vergleich der Ist- mit den Sollwärmeströmen. Die Abweichungen liegen im Bereich von maximal 0,5 %.



Abbildung 8: Wärmeströme: Ist versus Soll

Die Verteilung der Wärmeströme auf die Stränge zeigt Abbildung 9. Hier ist die Verteilung etwas uneinheitlicher und liegt mit maximal 1,5 % durchaus im akzeptablen Bereich. Im Konvektivteil wird die Kalibrierung der Wärmeströme nicht über die Verschmutzungsdicke sondern über den Korrekturwert vorgenommen. Dieser Korrekturwert ist für jeden der Wärmetauscher einzeln anzupassen [18]. Die Verschmutzungsdicke wird homogen zu 3,0 mm angenommen. Den Vergleich der resultierenden Wärmeströme mit den Werten aus der Auslegung zeigt Abbildung 10. Die maximale Abweichung liegt hier mit 1,0 MW (2,2%) im Zwischenüberhitzer 1a vor. Eine Überprüfung der Simulationsergebnisse ist über die Rauchgastemperaturen vor und nach den jeweiligen Wärmeübertrager möglich, da diese aus der wärmetechnischen Auslegung vorliegen. Diesen Vergleich zeigt Abbildung 11. Die Abweichungen liegen alle deutlich unter 1 %, lediglich die Temperatur nach dem Economiser weicht mit 22 K (5.8 %) deutlicher ab. Das liegt an einer erhöhten Dissipation von turbulenter kinetischer Energie, die im ECO-Bereich durch eine erhöhte turbulente kinetische Viskosität verursacht wird. Dieses Phänomen wird durch die Anwendung des k--Turbulenzmodells in Verbindung mit der geringen Porosität des Rippenrohrbündels verursacht. Auf die Ergebnisse der Kopplung hat es keinerlei Einfluss, da die Wärmemenge über den K-Wert korrigiert wird, lediglich die Temperatur nach dem ECO wird zu hoch berechnet [3].





Abbildung 9: Wandwärmeströme der einzelnen Stränge



Abbildung 10: Wärmeströme Konvektivteil: Ist versus Soll



Abbildung 11: Rauchgastemperaturen: Ist versus Soll



Insgesamt sind die Abweichungen zwischen der wärmetechnischen Auslegung und der Simulation sehr gering. Da die Auslegung zur Kalibrierung der Modelle verwendet wurde, ist dieses Ergebnis zufriedenstellend. Eine Plausibilitätsprüfung der verwendeten Modelle stellt der Vergleich der Temperaturen dar. Diese wurden nicht kalibriert, sondern stellen Simulationsergebnisse dar. Die dabei erzielten hohen Übereinstimmungen können als erstes positives Resultat der Simulation gewertet werden. Eine weitere Plausibilitätsprüfung stellt die Simulation der Teillastfälle dar, auf die nicht näher eingegangen wird [3].

5.6 Schieflagen

Der Einfluss der Rauchgasschieflagen wird unterteilt in Schieflagen, welche durch die Strömung induziert sind (Strömungsschieflagen) und solche, die aus Kohleungleichverteilung an den Mühlen resultiert (Feuerungsschieflagen). Im Betrieb werden alle Brenner einer Brennerebene von einer Kohlemühle bedient. Durch die Zuleitung kann es innerhalb der einzelnen Ebenen zu einer Ungleichverteilung des Kohlemassenstroms in den einzelnen Brennern kommen. Laut Alstom kann die Abweichung vom Mittelwert bis zu 10 % des Massenstroms betragen. Um die Auswirkungen von Schieflagen im Kessel beurteilen zu können, werden diese mit Hilfe der gekoppelten Simulation berechnet. Dabei werden in jeder Brennerebene zwei der vier Mühlen mit 10 % weniger Kohlemassenstrom beaufschlagt, die anderen beiden Mühlen entsprechend mit 10 % mehr. Abhängig davon, welche Brenner mit verringertem Massenstrom beaufschlagt werden, werden drei Szenarien berechnet, die Abbildung 12 visualisiert:

- Schieflage 1: Umlaufende Schieflage: Die Brenner mit geringerem Massenstrom sind spiralförmig rechtsdrehend angeordnet.
- Schieflage 2: Gerade Schieflage vorne: Alle Brenner auf der Kesselvorderseite haben weniger Kohlemassenstrom.
- Schieflage 3: Diagonale Schieflage: Die Brenner links vorne und rechts hinten werden mit weniger Kohlemassenstrom beaufschlagt.



Abbildung 12: Schieflagenszenarien



Im Vollastfall ohne Schieflage weichen die übertragenen Wärmemengen in den einzelnen Strängen im Konvektivteil um bis zu 4 % voneinander ab. Im Membranwandbereich beträgt die maximale Abweichung gut 1 %. Soll eine Schieflage Einfluss auf die Wärmeverteilung auf die Stränge haben, so müssen diese Werte deutlich überschritten werden. Bei den berechneten Schieflagen im Vollastfall liegen die maximalen Abweichungen jedoch nur bei 5 % im Konvektivteil und gut 1 % in der Membranwand. Damit lässt sich kein Einfluss der Feuerungsschieflagen auf die Wärmeverteilung feststellen. Dieses Ergebnis ist nicht unrealistisch, da die starke Turbulenz und Vermischung, die durch die Tangentialfeuerung entsteht, das Feuerungssystem relativ unempfindlich gegen Schieflagen macht. In den Teillastfällen sinkt die Strömungsgeschwindigkeit des Rauchgases und damit auch die Vermischung. Abbildung 13 zeigt die Wärmeströme in den einzelnen Strängen im Konvektivteil im 80-Prozent Lastfall mit Schieflage 2. In den unteren konvektiven Heizflächen ergeben sich deutliche Ungleichgewichte, der Wert des zweiten Strangs im SH2 liegt um über 20 % niedriger als der im vierten Strang. Ähnliches Verhalten zeigt auch die Schieflage 3, bei Schieflage 1 lässt sich keine Ungleichverteilung feststellen. Die Schieflage führt in Apros in den Dampfsträngen zu unterschiedlichen Temperaturen, allerdings fallen die Unterschiede durch die Vermischung der Stränge nach dem Überhitzer 2 gering aus. wie Tabelle 4 zeigt.

Parameter	Einheit	Mittelwert	Strang 1	Strang 2
T nach SH2	[°C]	573,74	575,36	572,13
T nach Einspritzung 1	[°C]	556,67	559,50	553,83
T nach SH3	[°C]	644,07	644,71	643,44
T nach Einspritzung 2	[°C]	623,17	624,04	622,31
T nach SH4	[°C]	704,60	704,45	704,74
T vor RH1	[°C]	432,93	-	-
T nach RH1	[°C]	585,74	585,49	586,00
T nach RH2	[°C]	706,13	704,86	707,39









Die Abweichung beträgt lediglich 1 %. Es kann festgestellt werden, dass die Feuerung zwar in Teillast nicht vollständig in der Lage ist, die Schieflagen auszugleichen, die Überkreuzungen und Vermischungen auf der Dampfseite dies aber problemlos abfängt. Die Abbildungen zeigen exemplarisch den Verlauf eines Kesselrohres im Strang 1. Hier sind die Strömungsschieflagen und die daraus resultierenden Temperaturschwankungen im Feuerraum zu erkennen. Das Rohr verläuft im Feuerraum spiralförmig, bis es ab der Höhe von 34 m senkrecht den Kessel hoch läuft. Demzufolge schwankt der Temperaturverlauf auf der Rohroberfläche, da sich das Rohr abwechselnd zur Flamme hin und weg bewegt. Die maximalen Wärmestromdichten belaufen sich auf rund 300 kW/m² woraus Temperaturmaxima von rund 1200 °C auf der Schmutzschicht resultieren.





5.7 Verschmutzung

Die Verschmutzung des Dampferzeugers während des Betriebs ist keineswegs konstant, vielmehr schwankt sie zwischen den einzelnen Abreinigungsphasen. Daher ist es besonders interessant, das Verhalten des Kessels in unterschiedlichen Verschmutzungszuständen zu kennen. Als Maß für die Verschmutzung wird ein Verschmutzungsfaktor *c*_n definiert:

$$c_F = \frac{U_{verschmutzt}}{U_{sauber}} \tag{1}$$

Als sauberer Wärmedurchgangskoeffizient wird der Wärmedurchgangskoeffizient von Stahl angenommen, dabei wird der Wärmedurchgangskoeffizient von sauberem Stahl U_{sauber} berechnet. Mit Hilfe von Gleichung (1) berechnet sich der Verschmutzungsfaktor für normale Verschmutzung zu 0,717. Zur Analyse werden nun drei Fälle mit stärkerer Verschmutzung ($c_r = 0,70;0,65;0,60$) und zwei Fälle mit geringerer Verschmutzung ($c_r = 0,75;0,80$) gerechnet. Die Verschmutzung des Konvektivteils wird so angepasst, dass sich der Wärmedurchgangswert genau um den gleichen Prozentsatz wie an der Membranwand verändert. Abbildung 16 zeigt die Summe der übertragenen Wärmeströme für die berechneten Kesselverschmutzungen im Volllastfall. Es ist gut zu erkennen, dass die Summe fast gleich bleibt. Der Kesselwirkungsgrad wird von den hier berechneten Verschmutzungen kaum beeinträchtigt, der dem Rauchgas entzogene Wärmeströme. In Abbildung 16 sind die Wärmeströme in den einzelnen Wärmeübertragerbereichen aufgeschlüsselt.





Abbildung 15: Übertragener Gesamtwärmestrom für verschiedene Verschmutzungen



Abbildung 16: Vergleich der Wärmeströme für verschiedene Verschmutzungen

Für höhere Verschmutzungen wird an der Membranwand weniger Wärme übertragen, dieses Defizit wird jedoch von den konvektiven Heizflächen, die dadurch mit höheren Rauchgastemperaturen angeströmt werden, ausgeglichen. Die verschobenen Wärmemengen haben auch Auswirkungen auf die Prozesssimulation in Apros, deren Ergebnisse in Tabelle 5 aufgeführt sind. Es zeigt sich, dass für erhöhte Verschmutzung die Einspritzmassenströme ansteigen, auch die Temperatur nach der Zwischenüberhitzung steigt, wodurch auch der Einspritzkühler in der Zwischenüberhitzung aktiv werden muss. Der Wirkungsgradverlust bleibt jedoch minimal. Einzig der Wirkungsgrad für den relativ sauberen Kessel (cF = 0,80) liegt leicht niedriger, da aufgrund der hier geringeren Wärmemenge im Konvektivteil die ZÜ-Temperatur nicht mehr erreicht wird. Ein kritischer Parameter bei steigender Verschmutzung ist die Brennkammeraustrittstemperatur. Abbildung 17 zeigt, dass diese bei einem Verschmutzungsfaktor von 0,60 um über 20 K ansteigt und somit deutlich über der vorgesehenen Temperatur liegt. Um im Betrieb Schädigungen durch eine zu hohe Brennkammeraustrittstemperatur, sollte rechtzeitig eine Abreinigung erfolgen.





Abbildung 17: Brennkammeraustrittstemperaturen für verschiedene Verschmutzungen

Parameter	Einheit	c _F = 0,60	c _F = 0,65	c _F = 0,70	c _F = 0,717	c _F = 0,75	c _F = 0,80
Bruttoleistung	[MW]	549,73	550,46	547,3	547,8	549,77	546,37
Nettoleistung	[MW]	504,89	505,56	502,7	503,16	504,92	501,87
Nettowirkungsgrad	[%]	49,95	50,02	49,74	49,78	49,96	49,65
FD-Temperatur	[°C]	704,76	704,76	704,72	704,71	704,7	704,71
ZÜ-Temperatur	[°C]	722,17	722,26	718,3	716,19	714,41	712,94
FD-Druck	[bar]	352,09	353,31	353,04	353,82	355,32	353,89
FD-Massenstrom	[kg/s]	336,95	338,29	338,06	338,9	340,49	338,97
Einspritzmassenstrom	[kg/s]	29,27	24,90	19,57	17,98	15,45	11,79

 Tabelle 5:
 Ergebnisse der Prozesssimulation f
 ür verschiedene Verschmutzungen

5.8 Ausblick

Ausblickend bleibt zu sagen, dass das Projekt erfolgreich abgeschlossen werden konnte. Das Schädigungsmodell läuft stabil. Hier muss erwähnt werden, dass man sich an den berechneten Spannungen orientieren sollte, denn die Korrelation für Zeitstandfestigkeit und Ermüdung sind aufgrund des geringen Datenbestandes derzeit unsicher. Die Kopplung von Apros mit CFD läuft ebenfalls stabil. Hier limitiert derzeit die Rechengenauigkeit, da das verwendet Netz mit knapp 4 Millionen Zellen zwar ausreichend ist, aber im Bereich der konvektiven Heizflächen noch Potential zur Verbesserung besteht, da die Anwendung von porösen Medien Unsicherheiten birgt.



6 Wesentliche terminliche und inhaltliche Abweichungen zum Projektantrag

Die Milestones wurden eingehalten.

Der angestrebte Lösungsweg konnte gegangen werden, sodass die Projektziele komplett abgearbeitet worden sind. Sowohl das Programm für die instationäre Simulation (APROS) als auch für die gekoppelte Berechnung (Ansys Fluent + Apros) waren ausreichend um die Ziele zu erreichen.

Die Projektziele wurden eingehalten.

7 Publikationen und Patente

7.1 Im Rahmen des Projektes entstandene Publikationen

7.1.1 Begutachtete Publikationen

- Spliethoff, H., Wauschkuhn, A., Schuhbauer, C. (2011). Anforderungen an zukünftige Kraftwerke. CIT, (83), 1792–1804.
- [2] Schuhbauer, C., Tschaffon, H., Kluger, F., Heim, M., Spliethoff, H. (eingereicht). Life assessment of headers in coal fired once-through boilers for 700°C steam power plants. Applied Energy.
- [3] Schuhbauer, C., Tschaffon, H., Kluger, F., Heim, M., Spliethoff, H. (eingereicht). Coupled simulation of a tangentially hard coal fired 700°C boiler. Fuel.

Zwei weitere Veröffentlichungen sind derzeit in Arbeit.

7.1.2 Nicht-begutachtete Publikationen

- [4] Schuhbauer, C., Tschaffon, H., Kluger, F., Spliethoff, H. (2011). Transiente Berechnung thermomechanischer Schädigung dickwandiger Bauteile im 700 °C-Kraftwerk durch Anfahrvorgänge. Kraftwerktechnisches Kolloquium (Vol. 3, pp. 681–698).
- [5] Schuhbauer, C., Spliethoff, H. (2012). Bewertung von Kohlekraftwerken und Verbesserung ihrer Dynamik in Hinblick auf die zukünftigen Anforderungen. Flexibilitäts- und Effizienzsteigerung von Bestandskraftwerken. Bremen: VDI Wissensforum.

7.2 Gemeinsame Publikationen zweier oder mehrerer KW21 Teilprojekte

In diesem Teilprojekt wurden keine gemeinsamen Veröffentlichungen publiziert.



7.3 Weitere Publikationen

- [6] Bundesministerium f
 ür Wirtschaft und Technologie: Verf
 ügbarkeit und Versorgung mit Energierohstoffen (2006); http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/ energierohstoffbericht,property=ppd,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf aufgerufen am 27.11.12
- Bundesministerium f
 ür Wirtschaft und Technologie: Energiedaten (2012); http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten/gesamtausgabe.html aufgerufen am 22.08.12
- [8] Fraunhofer IWES: Windenergie Report Deutschland (2012); http://www. fraunhofer.de/content/dam/zv/de/forschungsthemen/energie/Windreport-2011-de. pdf aufgerufen am 27.11.12
- [9] Zehtner, W.; Betriebsoptimierung von Steinkohlekraftwerken durch Simulation. Dissertation (2009).
- [10] Zehtner, W.; Spliethoff, H.; Woyke, W.; Modellierung des dynamischen Verhaltens eines 450 MW-Steinkohlekraftwerkblocks. VGB Fachtagung Dampferzeuger/ industrie- und Heizkraftwerke (2006).
- [11] Zehtner, W.; Spliethoff, H.; Woyke, W.; Optimierung der Leittechnik von modernen Kohlekraftwerken durch Simulation. VGB Konferenz Elektrotechnik, Leittechnik, Informationsverarbeitung im Kraftwerk (2008).
- [12] VDI/VDE; Blockregelung von Wärmekraftwerken VDI/VDE 3508, VDI/VDE Richtlinie (2003).
- [13] Epple, B.; Leithner, R.; Linzer, W.; Walter, H.: Simulation von Kraftwerken und Feuerungen, Springer-Verlag (2012).
- [14] Sauer, C.: Detaillierte gekoppelte Simulation von Kraftwerksfeuerung und -dampferzeuger, Dissertation, Stuttgart (2007).
- [15] Matschke, A.: Über die Trennung und Vereinigung von Dampf in Großkraftwerken, Dissertation, Stuttgart (2012).

7.4 Im Rahmen des Projektes entstandene Patente

Im Rahmen dieses Teilprojektes sind keine Patente entstanden.

8 Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses

8.1 Studentische Mitarbeiter

J. BeckerUnterstützung bei der Umsetzung der Kondensatstopp- und Leistungsregelung



8.2 Studien-, Semester- und Bachelorarbeiten

Entwicklung eines Algorithmus zur gekoppelten Simulation von Feuerung und Dampfkreis des 700°C-Kraftwerks
Implementierung einer Leistungs- und Kondensatstoppregelung in einer 700°C-Kohlekraftwerkssimulation
Erstellen eines 700°C-Steinkohlekraftwerk-Modells zur Durchführung instationärer Simulationen
Berechnung von Beheizungsschieflagen im Dampferzeuger des 700 °C-Kraftwerks mittels CFD
Sensitivitätsanalyse verschiedener CFD-Modelle an einer Steinkohlebrennkammer
Berechnung der Lebensdauer eines Frischdampfsammler mittels FEM im 700 °C-Dampfkraftwerk
Simulation einer Tangentialfeuerung und deren Schieflagen mittels CFD
Anforderungen an die Dynamik konventioneller Kraftwerksblöcke für die zukünftige Stromversorgung
Modifizierung der instationären Simulation eines 700 °C-Kraft- werkes und Sensitvitätsanalyse der Sammlerschädigung anhand verschiedener Werkstoffe und Abmessungen
Technische Anforderungen an ein zukünftiges Energiesystem für Bayern 2050 (in Arbeit)
Umbau eines dynamischen Kraftwerkmodells zur Ermittlung der Lebensdauerschädigung durch Beheizungsschieflagen und Heizflächenverschmutzung
Ermittlung der Schädigung von Dampfsammler und -verteiler im 700 °C-Steinkohlekraftwerk durch An- und Abfahrvorgänge
Diplom- und Masterarbeiten
Instationäre Simulation eines GuD-Kraftwerkes (in Arbeit)
Dynamische Modellierung von gefeuerten Dampferzeugern
Kopplung von instationärer Simulationssoftware mit CFD zur Berechnung der Bauteilschädigung bei Heizflächenverschmutzung und Rauchgasschieflagen
Betrachtung des Werkstoffverhaltens bei 700 °C – Kraftwerken durch dynamische Simulation

8.4 Promotionen

C. Schuhbauer Dynamische Simulation des 700°C-Steinkohlekraftwerks (in Arbeit)



9 Forschungsprogramme des Bundes und der EU

9.1 Angaben, ob weitere Drittmittel zum Projektthema eingeworben wurden, insbesondere aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen des Bundes und der EU

Es wurden keine weiteren Drittmittel im Rahmen des Teilprojekts eingeworben

9.2 Geplante Antragsstellung bzw. künftige Förderung aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen von Bund, EU etc. sowie allgemeinen Förderprogrammen (z.B. DFG)

Energy Valley Baveria Kraftwerksdynamik:

Dieser Antrag beinhaltet zwei Teile:

- 1. Dynamische Simulation eines GuD Kraftwerkes
- 2. Konstruktion und Auslegung einer Verdampferstrecke zur Bestimmung von Wärmeübergangskoeffizienten etc.



Arbeitskreis Kraftwerkssysteme und Dampferzeuger

Projekt: BY 6DE

Entwicklung von hocheffizienten Kraftwerken zur Nutzung regenerativer Energie aus Abfall

Projektleiter:	Prof. DrIng. Hartmut Spliethoff Lehrstuhl für Energiesysteme Technische Universität München
Mitarbeiter:	DiplIng. Martin J. Murer M.Sc.
Finanzierung:	Martin GmbH für Umwelt- und Energietechnik Bayerisches Forschungsallianz GmbH

1 Ausgangssituation

1.1 Abfallhierarchie und Energieeffizienzanforderungen

Die Europäische Abfallrahmenrichtlinie (2008/98/EG) definiert im Artikel 4 die Abfallhierarchie. Erstmals wird in dieser Hierarchie die energetische Verwertung, sprich die Verbrennung von Abfallen zur Produktion von Strom und oder Wärme, als eigene Stufe aufgeführt. Ist ein als Abfall definierter Stoff nicht weiter stofflich verwertbar (Recycling), muss er der energetischen Nutzung zugeführt werden, sofern er einen technisch verwertbaren Heizwert hat. Erst wenn auch dieses Kriterium nicht erfüllt wird, darf Abfall deponiert werden [10].

Als energetische Verwertung zählen nur Anlagen die aus dem Energieinhalt des Abfalls eine Mindestmenge Strom und oder Wärme produzieren. Zum Nachweis dieses Kriteriums ist im Anhang II der Abfallrahmenrichtlinie (Fußnote S. 24 [10]) eine Formel definiert, welche aus Jahreswerten die durchschnittliche Energieeffizienz bestimmt.

$$Energieeffizienz = (Ep - (Ef + Ei)) / (0,9 x (Ew + Ef))$$

Die Energieeffizienz welche für eine Neuanlage eingehalten werden muss um als energetische Verwertung zu gelten, entspricht einem elektrischen Nettowirkungsgrad von 21 % oder einem Jahres Nettowirkungsgrad von 17 % bei einer durchschnittlichen Wärmeauskoppelung von 30 %. Im Vergleich dazu liegen die Durchschnittswerte in Deutschland für den elektrischen Wirkungsgrad bei ca. 11 % bei einer Wärmeauskoppelung von 28 %.

Neuanlagen nach dem Stand der Technik erreichen ca. 20 %, dieser Wert ist bedingt durch Frischdampfparameter von 40 bar und 400 $^\circ C,$ die wegen korrosiver Bestandteile



Effiziente Energieerzeugung aus Abfall

im Rauchgas gewählt werden. Daraus wird ersichtlich, dass auch neue Anlagen nur mit Hilfe von Kraftwärmekopplung das Effizienzkriterium sicher erfüllen können. Einige umgesetzte Konzepte für Abfallverbrennungsanlagen erreichen jedoch bereits heute Wirkungsgrade von 27 – 31 %, dies sind aber Ausnahmen die nur unter speziellen Rahmenbedingungen möglich sind. Zum Beispiel wird in manchen Europäischen Ländern der produzierte Strom aus dem biogenen Anteil des Abfalls subventioniert.



Abbildung 1: TQ-Diagramm eine Müllverbrennungsanlagenkessels nach dem Stand der Technik mit Frischdampfparameter von 40 bar und 400 °C

1.2 Wirkungsgradsteigernde Maßnahmen

Wirkungsgradsteigernde Maßnahmen basieren in Müllverbrennungsanlagen auf denselben thermodynamischen Prinzipien wie in Kohlekraftwerken, nur müssen dabei andere Randbedingungen wie Anlagengröße und besonders Hochtemperaturchlorkorrosion berücksichtigt werden.

Eine der am häufigsten diskutierten Maßnahmen zur Wirkungsgradsteigerung in Müllverbrennungsanlagen ist die Erhöhung der Frischdampfparameter [11], [12], [13].Dies ist jedoch wegen der erhöhten Korrosion nur bedingt möglich. Ein Anhebung der Parameter von den typischen Werten von 40 bar und 400 °C auf 70 bar und 480 °C erlaubt einen finanziellen Spielraum von 10 zusätzlichen Tagen der Unverfügbarkeit der Anlage, ohne die Berücksichtigung von extra Reparaturkosten [14].

Eine weitere wirkungsgradsteigernde Maßnahme ist die Nutzung von Niedertemperaturwärme. Die Wärme wird meist zur Vorwärmung des Speisewassers benutzt [12], [15], [16]. Niedertemperaturwärme besitzt aber nur einen niedrigen Exergieinhalt und kann somit nur minimal zu einer Wirkungsgradsteigerung beitragen [8].

In zwei Müllverbrennungsanlagen wurde eine Zwischenüberhitzung umgesetzt um den elektrischen Wirkungsgrad zu steigern. Dies ist zum einen die Anlage in Rüdersdorf, wo die Zwischenüberhitzung bei 20 bar und 420 °C mittels Rauchgas erfolgt [17]. In Amster-



dam hingegen wird bei einem geringeren Druck von 14 bar auf 320 °C zwischenüberhitz. Die Zwischenüberhitzung erfolgt mittels Sattdampf aus der Trommel. Vorteil dieser Methode ist die im Vergleich zum Rüdersdorfkonzept der geringere Anteil der Heizflächen, welche durch Korrosion belastet werde, da für die Zwischenüberhitzung mehr Verdampferheizfläche benötigt wird [18].

1.3 NO_x-Emissionen

Bei der Verbrennung entstehen aus dem Brennstoff und der Verbrennungsluft niederenergetische Produkte in fester, flüssiger oder gasförmiger Form. Bei den gasförmigen Produkten handelt es sich hauptsächlich um die Gase Stickstoff (N₂), Wasser (H₂O), Sauerstoff (O₂) und Kohlendioxid (CO₂), die, unter Vernachlässigung der Langzeitwirkung von CO₂ als Treibhausgas, alle als umweltneutral einzustufen sind. Zusätzlich werden bei allen Verbrennungsvorgängen auch umweltbelastende Stoffe emittiert, die zu Schäden an Mensch, Tier, Vegetation, technischen und kulturellen Bauwerken führen können, weshalb die Emission dieser Stoffe durch technische Maßnahmen soweit wie möglich eingeschränkt werden muss.

Zur Kategorie dieser schädlichen Stoffe gehören unter anderem Stickstoffoxide. Dabei handelt es sich um einen Sammelbegriff für verschiedene Oxide des Stickstoffs, welche gewöhnlich unter dem Sammelbegriff NO_x zusammengefasst werden. Die drei Stickoxidformen NO, NO₂ und N₂O sind die bei Verbrennungsprozessen auftretenden Typen.

Aufgrund der Erkenntnisse über die Gefährlichkeit der Stickoxide [19] wurden weltweit Immissionsgrenzwerte festgelegt sowie politische, rechtliche und wirtschaftliche Instrumente geschaffen, um die Emissionen mengenmäßig zu begrenzen. In Deutschland wurde dieser Problematik durch die Einführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (BImSchG) vom 26.09.2002 mit entsprechend zugeordneten Verwaltungsvorschriften Rechnung getragen. Die Grenzwerte für Abfallverbrennungsanlagen sind in der 17. Bundesimmissionsschutzverordnung (17. BImSchV) geregelt. Mit einer Änderung vom 27.01.2009 wurde den vorhandenen Halbstunden- und Tagesmittelwerten für Stickoxide ein zusätzlicher Jahresmittelwert als einzuhaltender Grenzwert hinzugefügt. Dieser Grenzwert gilt für Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung von mehr als 50 MW_{th} die nach dem 31. Dezember 2012 in Betrieb gehen oder wesentlich geändert werden [20].

Auf europäischer Ebene ist die Industrial Emissions Directive (IED) im Januar in 2011 in Kraft getreten, die weiterhin NO_x Grenzwerte von 200 mg/Nm³ als Tagesmittelwert vorsieht.

Allerdings plant das Bundesumweltministerium (BUM) bei der aktuellen Umsetzung der IED in die nationale 17. BImSchV die NO_x-Werte weiter zu verschärfen. Hierdurch ergibt sich insbesondere auch für Altanlagen ein weiteres Marktpotential für NO_x Minderungs-Maßnahmen [21].


	17. BImSchV	Arbeitsentwurf			
	Für bestehende Müllverbrennungs- anlagen	Für MVA's (größer 50 MWth) ab 2013	Umsetzung in Deutschland		
Jahresmittelwert	-	100	-		
Tagesmittelwert	200	200	100		
Halbstundenmittelwert	400	400	200		

Tabelle 1: Grenzwertänderung von NO, Emissionen durch 17. BlmSchV (in mg/Nm³; bezogen auf 11% O2 und ohne Gutrechnung) [20]

Im deutschen Anlagenpark erfolgt die Einhaltung der Grenzwerte mithilfe der selektiven katalytischen Reduktion (SCR) bzw, der selektiven nicht katalytischen Reduktion (SNCR).



Abbildung 2: NO₂ Emissionen als Jahresmittel von bestehenden Anlagen in Deutschland mit SCR- und SNCR-Entstickung [22]

Abbildung 2 stellt die Jahresmittelwerte der NO₂ Emissionen für 64 deutsche Müllverbrennungsanlagen für das Jahr 2006 dar. Ungefähr zwei Drittel der Anlagen sind mit der SCR-Technologie ausgerüstet, der Rest verwendet die SNCR-Technologie. In Abbildung 2 ist ein deutlicher Unterschied bei den Abscheideraten für NO_x zwischen der SCR- und der SNCR-Technologie zu erkennen. Ein Großteil der Anlagen mit SCR-System hält bereits den neuen Jahresgrenzwert von 100 mg NO₂/Nm³ ein. Hingegen erreichen nur ein Viertel der Anlagen, welche die SNCR-Technologie verwenden, eine Emission unter 100 mg NO₂/Nm³.



1.4 Gestufte Verbrennung

Mit rostbasierten Verbrennungssystemen für Hausmüll werden im Vergleich zu Kohle, Öl oder Gas nur geringe Temperaturen erzielt. Deshalb spielt die Bildung von thermischen und prompten NO_x im Vergleich zum Brennstoff - NO_x Bildung eine geringe Rolle. Sørum hat festgestellt, dass bei der Verbrennung von Abfällen 95 % aller NOx Emissionen als NO auftreten, der Rest ist NO₂ und N₂O. Zwischen 80 und 90 % der Emissionen können dabei dem Brennstoff NO_x Bildungsmechanismus zugeordnet werden. Thermisches NO_x trägt mit einer Rate von 5 bis 10 % zu den Emissionen bei, der Rest stammt vom prompten NO_x [23]. Hafner hat mittels Messdaten nachgewiesen, dass die aus Kohle und Gasverbrennung bekannten NO_x-Bildungstheorien auch für die Verbrennung von Abfall gültig sind. Dabei sind 99,7 % des Stickstoffs (abgesehen von N₂) in der Form von NO, NH₃ oder HCN gebunden [24].



Abbildung 3: Konzentration von NO, NH₃, HCN und TFN für eine mit Methylaminen angereicherte Propangasflamme für unterschiedliche Luftzahlen [25]

Eberius untersucht die Umsetzung von im Brennstoff enthaltenen Stickstoffverbindungen für unterschiedliche Luftzahlen. Dabei hat er eine Propangasflamme mit Methylaminen als Stickstoffträger angereichert. Die Verhältnisse von NO, NH₃ und HCN für die betrachteten Luftzahlen sind in Abbildung 2 dargestellt. Die Versuche habe ein Minimum an gebundenem Stickstoff (TFN: total fixed nitrogen) für eine Luftzahl von 0,7 gezeigt.

Den Verlauf der Kurven kann anhand der Reaktionspfade, welche in Abbildung 4 dargestellt sind besser verstanden werden. NH₃ kann je nach Stöchiometrie über NH₁-Radikalen zu NO oder N₂ reagieren. Die Reaktionspfad Richtung NO dominiert in Atmosphären mit Sauerstoffüberschuss, wo hingegen der Abbau von NH₁-Radikalen zu N₂ hauptsächlich NO als Reaktionspartner benötigt.





Abbildung 4: Reaktionspfade von NH3 und NHi-Radikalen zu NO und N₂ (Reaktionen von [26], Bild angepasst von [27])

Die Reaktion von NH_i-Radikalen mit NO wird im Rahmen von Konzepten der gestuften Verbrennung genutzt, um NO_x-Emissionen zu reduzieren. Dabei wird zwischen Luftstufung und Brennstoffstufung unterschieden. Bei der Brennstoffstufung findet die Primärverbrennung unterstöchiometrisch statt und liefert somit NO und NH_i-Radikalen für den gegenseitigen Abbau zu N₂. Bei der Brennstoffstufung wird Hauptsächlich NO gebildet, welches dann mit CH_i-Radikalen aus dem Reduktionsbrennstoff zu HCN und dann weiter zu NH_i-Radikalen reagiert.





Abbildung 5: Luft und Brennstoffstufung in Verbrennungssystemen (angepasst von [28])

Für feste Brennstoffe ist die Brennstoffstufung verfahrenstechnisch komplizierter Prozess und lässt sich nur für Staubfeuerungen erfolgreich umsetzen. Untersuchung zu Brennstoffstufung wurden von Spliethoff für Schmelzkammerfeurungen im industriellen Maßstab durchgeführt [29]. Experimente und Simulationen zur Brennstoffstufung für Biomasse wurden von Salzmann und Nussbaumer durchgeführt [30]. Für die Kohlestaubverbrennung findet auch die Luftstufung Anwendung, Maier mit Kollegen haben sich damit detaillierter befasst [31].

Für die Abfallverbrennung ist die Luftstufung eine vielversprechende feuerungstechnische Maßnahme, welche schon an einigen Anlagen umgesetzt wurde [32]. Zusätzliches Potential dieser Technologie soll im Rahmen dieses Projekts erarbeitet werden.

2 Projektziele

Verschärfung von Verordnungen [20] und Richtlinien [10] führen zu Nachfrage von Anlagen mit höherer Energieeffizienz und geringeren NO_x-Emissionen.

Ziel des Teilprojektes BY 6DE Effiziente Energieerzeugung aus Abfall ist die Optimierung des Wasser-Dampfkreislaufes, in Bezug auf Wirkungsgradsteigerung, sowie die Verbesserung der Feuerung (gestufte Verbrennung) für Kraftwerke im mittleren Leistungsbereich die mit Hausmüll oder vergleichbaren Biomassen befeuert sind. Beide Punkte sollen umgesetzt werden ohne die Verfügbarkeit von solchen Anlagen zu reduzieren.

Für die Umsetzung des soll ein CFD-Modell entwickelt werden, welches anhand von Messungen Validiert werden soll.



2.1 Umsetzung der Hinweise aus den bisherigen Begutachtungen

Wie in der Stellungnahme vom 04.04.2011 angemerkt wurde das Arbeitspaket "thermische Verhalten der Aschekomponenten in einer TGA und thermodynamische Berechnungen" als Masterarbeit ([47]) mit Unterstützung der Bearbeiter des Projektes BY4DE bearbeitet.

3 Vernetzung

3.1 Vernetzung innerhalb KW21

Im Zusammenhang mit der Analyse von Depositionen in Müllverbrennungsanlagen wurde auf das Fachwissen des Projekts BY 4DE, zurückgegriffen (Siehe Abschnitt 2.1). In diesem Projekt werden ähnliche und noch ausführlichere Analysen von Depositionen in Kohlekraftwerken durchgeführt.

Ein reger Austausch fand mit dem Projekt BY 5DE im Bereich der CFD-Modellierung statt. Besonders im Bereich der Strahlungsmodellierung und Darstellung von Konvektivheizflächen.

Die im Projekt BY 7DE entwickelte Beschichtung von Membranwand und Überhitzerrohren wurde beim Einsatz der Korrosionssonde auf einem der Massenverlustringe aufgebracht um ihre Wirksamkeit zu testen. Die Korrosionssonde wurde in der Müllheizkraftwerk Coburg eingesetzt.

3.2 Vernetzung außerhalb KW21

Verschiedene Ansätze der Brennbettmodellierung wurden mit Herrn Kurz vom IFK der Universität Stuttgart und Herrn Schneider von der HTW Saarland diskutiert und verglichen.

4 Vorgehensweise und Methodik

Untersuchungen zur Steigerung der Energieeffizienz von Müllverbrennungsanlagen wurden mit der Software IPSE pro durchgeführt. Dabei handelt es sich um ein kommerzielles Kreislaufrechenprogramm. Verschiedene Schaltungen und Verbrennungseinstellungen wurden mit Hilfe dieses Programms getestet. Dieses Programm löst, aber nur die Massen und Energiebilanz aller Komponenten. Für die Wärmeübertragung im Kessel wurde ein eigener Code in Matlab entwickelt, welcher die Exergievernichtung durch die Wärmeübertragung berechnet [8]. Auch für die Optimierung der Anzapfdrücke in der Speiswasservorwärmerstrecke wurde ein Matlab Code verwendet.



Effiziente Energieerzeugung aus Abfall

Die Feuerung im Kessel selbst wurde mit der kommerziellen CFD-Software (Computational fluid dynamics) ANSYS Fluent simuliert. Ein vereinfachtes Brennstoffumsetzungsmodell, welches in Matlab implementiert wurde liefert Randbedingungen für die Gasfreisetzung aus dem Brennbett [33]. Die in der CFD-Software hinterlegten NO_x-Chemiemodelle wurden ausführlich untersucht und zusammen mit dem gesamten Vorgehen der Modellierung anhand von Messdaten validiert [3],[9]. Um die in den Messkampagnen untersuchten Kessel detailliert nachzubilden musste auch das Installierte SNCR-System abgebildet werden. Dies erforderte Eingriffe in die Strömung anhand von Quellthermen [35] und Anpassung der SNCR – Reaktionsparametern [37]. Für die Simulation von Flugaschepartikeln wurde ausschließlich auf Werte aus entsprechender Fachliteratur zurückgegriffen [46].

Die Analyse von Belägen aus einer Müllverbrennungsanlage wurde mittels unterschiedlicher Methoden, wie Elementaranalyse, Ascheschmelzmikroskopie, energiedisperse Röntgenfluoreszenz, Rasterelektronenmikroskopie, thermogravimetrische Analyse (TGA) und Differenzthermoanalyse (DTA)), durchgeführt.

5 Projektergebnisse und Ausblick

5.1 Optimierung der Energieeffizienz

Für die Optimierung der Energieeffizienz für Müllverbrennungsanlagen wurden zuerst der Wasser-Dampfkreislaufprozess und die verfügbare Wärme in Rauchgas getrennt voneinander optimiert. Erst nach einer detaillierten Einzelbetrachtung der beiden interagierenden Prozesse wurde eine gesamt Anlagenkonzept entwickelt und optimiert.

5.1.1 Wasserdampfkreislauf

Der Wasserdampfkreislauf wurde anhand von technischen Randbedingungen optimiert. Dabei wurde das Gesamtkonzept an den Wasserdampfkreislauf der Müllverbrennungsanlage in Amsterdam, welche einen elektrischen Nettowirkungsgrad von über 30 % im Jahresschnitt erreicht [4], bei einer Verfügbarkeit von über 91,5 % [33], angelehnt. Eine externe Zwischenüberhitzung die mit Sattdampf aus der Trommel betrieben wird, ist nötig um einen hohen Frischdampfdruck zu ermöglichen ohne die Erosion durch Tröpfchenschlag in den Niederdruckturbine zu erhöhen. Dies erlaubt den Frischdampfdruck an den maximalen Druck von verfügbaren Dampfturbinen in dieser Leistungsklasse anzupassen. Ein Wandüberhitzer [34] mit hinterlüfteten Platten erlaubt ein Anheben der Frischdampftemperatur ohne das Korrosionsrisiko zu erhöhen. Eine regenerative Speisewasservorwärmung ähnlich wie in Kohlekraftwerken verbessert schlussendlich das Temperaturniveau der Wärmezufuhr. Daraus resultiert ein Wasserdampfkreislauf (Siehe Abbildung 6) mit folgenden Parametern: Frischdampf mit 177 bar und 500 °C, externe Zwischenüberhitzung bei 23 bar auf 340 °C und Speisewassertemperatur am Kesseleintritt von 300 °C.





Abbildung 6: Optimierter Wasserdampfkreislauf mit Speisewasservorwärmung und externer Zwischenüberhitzung

5.1.2 Energiequalität im Rauchgas

Als zweiter Schritte wurde angestrebt die Feuerungsführung so zu gestalten, dass dem optimierten Wasserdampfkreislauf so viel wie möglich Wärme auf hohem Temperaturniveau zur Verfügung gestellt werden kann. Dabei wurde geachtet, dass sich die adiabate Flammentemperatur nicht zu erhöht. Erhöhung des Anteils an Hochtemperaturwärme wurden erreicht indem die Verbrennungsluft vorgewärmt und die Luftzahl reduziert wird. Nur wenige Rostsysteme können problemlos ohne Rostkühlung mit vorgewärmter Verbrennungsluft betrieben werden. Für zusätzliche Durchmischung und Reduktion der Verbrennungsluft betrieben werden. Für zusätzliche Durchmischung und Reduktion der Verbrennungsluftbefeuchtung. Die Luftbefeuchtung erfolgt mittels warmen Wassers aus der Rauchgaskondensation und trägt somit zur effizienten Nutzung von Niedertemperaturwärme bei. Die Temperaturverteilung und Wärmequalitätsverteilung sind in den zwei Diagrammen in Abbildung 7 für einen typischen Fall (Step 0) und den optimierten Fall (Step 5) dargestellt.





Abbildung 7: TQ-Diagramm und Wärmequalitätsdiagramm für eine Feuerungseinstellung einer optimierten Müllverbrennungsanlage

5.1.3 Energetische Gesamtoptimierung der Müllverbrennungsanlage

Der Wärmebedarf des Wasserdampfkreislaufs wurde auf die einzelnen Heizflächen im Kessel entsprechend Verteilt. Der Wandüberhitzer, welcher die Endüberhitzung von 450 auf 500 °C übernimmt, ist mit der thermodynamischen Mitteltemperatur als rechteckiger Höcker dargestellt. Nach dem Ekonomizer hat das Rauchgas noch eine Temperatur von 325 °C. Der Wärmeinhalt wird hauptsächlich für die Luftvorwärmung benötigt, ein Teil der Wärme kann auch noch für die Vorwärmung des Speisewassers verwendet werden. Die Kombination von optimierten Wasserdampfkreislauf und Wärmebereitstellung durch die Verbrennung ermöglicht einen theoretischen Nettowirkungsgrad von knapp über 37 %. Dieses Anlagen Konzept lässt sich nur ab einer gewissen Anlagengröße sinnvoll umsetzen.



Abbildung 8: TQ-Diagramm von Rauchgas und der Wasserdampfseite, sowie der indirekten Luftvorwärmung einer optimierten Müllverbrennungsanlage



5.2 Optimierung der Verbrennung

Der zweite wichtige Punkt in diesem Projekt ist die Modellierung der Verbrennung mit Hilfe von CFD. Modelle wurden Entwickelt und anhand von Messdaten unterschiedlicher Müllverbrennungsanlagen validiert. Diese Modelle wurden anschließend verwendet um einen Kessel entsprechend der optimierten Feuerungsführung noch weiter im Detail zu verbessern. Acht Fälle, welche sich in Luftstufung, Düsenanordnungen und Durchmesser unterscheiden wurden betrachtet. Als Bewertungskriterien wurden die Temperatur im unteren Feuerraum, die durchschnittliche NO_x-Konzentration im zweiten Zug und ein Ausbrandkriterium für die Rauchgase gewählt.

5.2.1 Validierung

Bereits im Zwischenbericht wurde ausführlich über die Messkampagne in Amsterdam berichtet. Die gesammelten Daten flossen in die ausgiebige Validierung von drei modellierten Lastfällen (90, 100 und 110 % Last). Messdaten des Schallpyrometers wurden mit Simulationsergebnissen für zwei unterschiedliche Ansätze verglichen. (Siehe Abbildung 9). Der zweite Ansatz erzielt über alle 21 Messpfade eine Mittlere Abweichung von 4 %, das sind weniger als 36 °C bei einer gemessen Temperaturschieflage von über 200 °C.



Abbildung 9: Vergleich von gemessener (Schallpyrometer) und simulierter (zwei verschiedene Ansätze) Temperatur für einen Kessel der Müllverbrennungsanlage Amsterdam

Weiter Modellierung von Anlagen in St. Gallen [45] und München [46],[48] wurden mit Messwerten verglichen und somit die entwickelten Modelle auf einer breiten Basis validiert.



5.2.2 Temperatur im Feuerraum

Die Rauchgastemperatur im Feuerraum ist ein wichtiges Kriterium für den Betrieb von Müllverbrennungsanlagen, weil diese sehr stark die Deposition von Aschebestandteilen an den Membranwänden beeinflusst. Bei sehr hohen Temperaturen kann es sogar zum Schlackefluß an den Wänden kommen, was zu erhöhter Abzehrung und Korrosion führt. Somit soll die Feuerung dahingehend optimiert werden, dass hohe Temperaturen und besonders Temperaturspitzen vermieden werden. Die Durchschnittstemperatur und maximale Temperatur im Feuerraumquerschnitt für die untersuchten Fälle ist in Abbildung 10 dargestellt. Die vier Fälle auf der rechten Seite des Diagramms sind Fälle mit stärker gestuften Verbrennung. Bei diesen Fällen wird die Wärmefreisetzung auseinandergezogen, was zu geringeren Temperatur führt.



Abbildung 10: Durchschnittstemperatur und maximale Durchschnittstemperatur im Feuerraumquerschnitt für unterschiedliche Feuerungsführungen in einer optimierten Müllverbrennungsanlage

5.2.3 NO_x-Emissionen

Wegen der Verschärfung der NO_x-Grenzwerte, sind NO_x-Emissionen einer der Hauptbewertungspunkte für die Effizienz einer Feuerung. Wie in Kapitel 1.4 beschrieben bietet die gestufte Verbrennung ein hohes Potential zur NO_x-Minderung. Für die Freisetzung der NO_x-Vorläuferspezies aus dem Brennbett wird in der Literatur ein breites Spektrum an Werten angegeben. Um die Aussagekraft der Untersuchung zu verbessern wurde deshalb jede der acht Untersuchungen mit drei unterschiedlichen Ansätzen für die NO_x-Bildung und Reduktion modelliert (GP, WB-0.5 und WB-0.9). Die bekannten NO_x-Bildungstheorien decken sich sehr gut mit der Tendenz der Ergebnisse, wieder schneiden die Fälle mit stark gestufter Verbrennung auf der rechten Seite von Abbildung 11 am besten ab, und schaffen es theoretisch auch ohne Sekundärmaßnahme die verschärften Grenzwerte einzuhalten. Reale Tests solcher Feuerungseinstellungen stehen jedoch noch aus, um ein Bestätigung dieser Ergebnisse zu erhalten.





Abbildung 11: Modellierte NO_x-Werte für drei unterschiedliche Modellierungsansätze für unterschiedliche Feuerungsführungen in einer optimierten Müllverbrennungsanlage

5.2.4 Rauchgasausbrand

Letzter Gesichtspunkt für die Bewertung der Feuerung ist der Ausbrand. CFD-Simulationen ermöglichen hauptsächlich eine Aussage über das Ausbrandverhalten der Rauchgase. Ausreichend Sauerstoff und gute Durchmischung werden für einen schnellen Ausbrand der Gase benötigt. Alle Betrachteten Fälle besitzen 4 Eindüsebenen für rezirkuliertes Rauchgas und Sekundärluft. Sie unterscheiden sich somit nur durch Düsenanordnungen und in welcher Reihenfolge die Sekundärgase zugegeben werden. Als Bewertungskriterium wurde die Länge zwischen dem Querschnitt wo theoretisch Stöchiometrie 1 erreicht wird und dem Querschnitt bei dem eine bestimmte Konzentration an unverbrannten Gasen erreicht wird bestimmt. Diese Distanz hängt stark von den Strömungsbedingungen in der Ausbrandzone ab. Der verfügbare Sauerstoff muss gut mit dem Rauchgas durchmischt werden um ein geringen Wert zu erreichen. Hier sticht besonders der Fall mit der Bezeichnung SC-UP heraus. Bei diesem Fall wird die Luftzahl von 17 m über dem Rost mit große. Sauerstoffüberschuss überschritten, bereits 1 m weiter befindet sich die letzte Eindüsebene, welche zusätzlich hilft den Sauerstoff aus der eigenen und der Ebene darunter gut zu Vermischen. Besonders die Strömung in der Mitte des Querschnitts ist von besonderer Bedeutung für die Durchmischung. Der Fall SC-UP erzielt auch sehr gute Ergebnisse für die anderen Bewertungskriterien und wird somit in Rahmen dieses Projektes als Empfehlung für eine optimierte Feuerungsführung vorgeschlagen. Mehr Informationen zu den unterschiedlichen Fällen finden sich in der aus diesem Proiekt hervorgehenden Promotion. Siehe Abschnitt 8.4.





Abbildung 12: Ausbranddistanz für brennbare Gase im Rauchgas für unterschiedliche Feuerungsführungen in einer optimierten Müllverbrennungsanlage

5.3 Flugasche und Korrosion

Deposition von Flugaschepartikel verringern über die Reisezeit eines Kessel die Effektivität der Heizflächen. Gleichzeitig werden mit den Partikeln korrosive Aschebestandteile an die Wandtransportiert und könne die Wand somit gut angreifen. Deshalb ist es wichtig die Flugbahn von Aschepartikel und die Chemie der Ablagerung genauer zu untersuchen.

5.3.1 Partikelflugbahnen

Die Flugbahn von Achepartikel wurde auch mittels CFD modelliert. Dazu wurde aus der Literatur eine Partikelgrößenverteilung ermittelt und ein Modell implementiert welches die Flugaschepartikel von der Brennbettoberfläche starten lässt. Unterschiedliche Haftkriterien wurden getestet, welche benutzt wurden um zu ermitteln ob Aschepartikel an der Membranwand haften. Eine Vielzahl von verschiedenen Faktoren beeinflussen die Flugbahn der Partikel. Besonders die Form der Partikel kann mit vorhandenen CFD-Modellen nicht realitätsnah abgebildet werden. Ein Teil der Deposition kommt von kondensierenden mineralischen Aschebestandteilen. Die Berechnung der Ablagerung weicht wegen dieser Ungenauigkeiten von realen Ablagerungen in Müllverbrennungsanlagen ab. Somit besteht weiterer Forschungsbedarf im Bereich der Depositionsmodellierung, besonders im Bereich der flüchtigen Aschebestandteile.





Particle Traces Colored by Particle Diameter (m)

Abbildung 13: Flugaschepartikelflugbahnen für unterschiedliche Partikeldurchmesser im 1. Und 2. Zug einer Müllverbrennungsanlage

5.3.2 Analyse des thermischen Verhaltens von Aschekomponenten

Im Arbeitspaket 4 wurden Aschedepositionen der Müllverbrennungsanlage in Amsterdam untersucht. Dabei wurden 3 Proben aus den Zügen 1,2 und 3, jeweils von derselben Höhe vom Anlagenbetreiber bereitgestellt. Die Aschen wurden mit unterschiedlichen Verfahren analysiert. Hervorzuheben sind dabei die Untersuchungen mittels Ascheschmelzmikroskop und die Differenzthermoanalyse. Hauptaugenmerk war dabei das Ascheschmelzverhalten. Zusätzlich war die chemische Zusammensetzung zur Abschätzung des Korrosionspotentials von Interesse. Abbildung 14 präsentiert die Zusammensetzung ermittelt mit induktiv gekoppeltem Plasma. Zu erkennen ist ein sehr großer Schwefelanteil, besonders im Vergleich zum Chlor. Die Anlage in Amsterdam wurde mit einer überdurchschnittlichen Verweilzeit der Rauchgase im 1. Zug ausgelegt. Dies führt zu einer Sulfatierung der Aschebestandteile, was nach Hunsinger [34] zu einer Senkung des Korrosionsrisikos führt. Dies deckt sich gut mit den beobachteten Korrosionsraten der beiden Kessel [33].





Abbildung 14: Zusammensetzung von Ascheablagerungen aus dem 1., 2. Und 3. Zug der Müllverbrennungsanlage Amsterdam untersucht mit induktiv gekoppeltem Plasma

5.3.3 Korrosionsmessungen

Im Rahmen dieses Projektes wurde der Einsatz einer Korrosionssonde geplant. Um eine bessere Aussagekraft für die Untersuchung zu erhalten wurde der geplante Messzeitraum verkürzt, dafür aber die Anzahl der Messsonden auf 3 erhöht. Somit wird das Korrosionspotential gleichzeitig im 1. Zug knapp oberhalb der Eindüsebene für das so genannte "VLN-Gas" (ca. 900 - 1000 °C Rauchgastemperatur), in der Mitte des 2. Zuges (700 - 800 °C Rauchgastemperatur) und am Austritt des 3. Zuges kurz vor den konvektiven Heiz-flächen (550 - 650 °C Rauchgastemperatur) gemessen. Für die ersten zwei Messpunkte wurde eine Sonde aus membranwandähnlichen Materialien gewählt, für die 3. Sonde typische Materialien für Überhitzer. Verschiedene Lastfälle, Sondentemperaturen und Arten der Feuerungsführung wurden untersucht. Die Messungen werden noch bis Anfang 2013 fortgeführt um verschiedene Einstellungen zu wiederholen und somit ein verlässlicheres Ergebnis zu erhalten.





Abbildung 15: Signal der Korrosionssonde im 2. Zug der Müllverbrennungsanlage Coburg im Vergleich zur Rauchgastemperatur für den Betrieb mit gestufter Verbrennung.

6 Wesentliche terminliche und inhaltliche Abweichungen zum Projektantrag

Die zweite Messkampagne die im Projektantrag beschrieben ist wurde in Zusammenarbeit mit der Fa. MARTIN GmbH im Zeitraum vom 12.-23.11.2012 am MHKW in Coburg durchgeführt. Dabei wurde Messungen für den Betrieb mit und ohne Luftstufung bei jeweils zwei verschiedenen Lastpunkten durchgeführt. Die Messergebnisse konnten bis zum Abgabetermin dieses Berichtes noch nicht aufgearbeitet werden.

7 Publikationen und Patente

7.1 Im Rahmen des Projektes entstandene Publikationen

7.1.1 Begutachtete Publikationen

- [1] Gohlke, O; Murer M.J: Kennzahlen für die Energiegewinnung aus Abfall mit Kraft-Wärme-Kopplung, Müllhandbuch (2009) 2 7300
- [2] Gohlke, O; Murer M.J: Anwendung von Energie-Kennzahlen auf Anlagen zur Nutzung von Energie aus Abfall, Wasser und Abfall Fachmagazin für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft, Bodenschutz, Altlasten und Umweltrecht (2009) 21 – 28
- [3] M. J. Murer, H. Spliethoff, C. M. W. d. Waal, S. Wilpshaar, B. Berkhout, M. A. J. v. Berlo, O. Gohlke, and J. J. E. Martin, High efficient waste-to-energy in amsterdam: getting ready for the next steps, Waste Management & Research, vol. 29, no. 10 Suppl, pp. S20_S29, 2011



[4] Martin J. Murer, Elisa Alonso-Herranz, Chantal M.W. de Waal, Hartmut Spliethoff, Marcel A.J. van Berlo, Oliver Gohlke, Energy efficiency monitoring, which sensors are really needed?, Waste Management & Research, eingereicht 07.2012

7.1.2 Nicht-begutachtete Publikationen

- [5] Gohlke, O; Murer M.J: Anwendung von Energie-Kennzahlen auf moderne europäische Beispielanlagen, 14. Fachtagung Thermische Abfallbehandlung (2009) 87 - 104
- [6] Murer M.J.; Spliethoff, H.; van Berlo, M.A.J.; de Waal, C.M.W.;Gohlke, O.: Comparison of Energy Efficiency indicators for Energy-from-Waste Plants, Sardinia 2009 Symposium (2009) S. 697-698
- [7] Murer M.J.; Spliethoff, H.; de Waal, C.M.W.; Schäfer T.;Gohlke, O.: Relative dependency of measurement uncertainty for boiler and plant efficiency, Venice 2010 Symposium (2010)
- [8] Murer M.J.; Spliethoff H.; Dräger R.; Seitz A.; Gohlke O.: Exergetic analysis of heat transfer and efficiency in EFW plants, Venice 2010 Symposium (2010)
- [9] M. J. Murer, S. Dürrschmidt, U. Martin, H. Spliethoff, S. Wilpshaar, C. M. W. d. Waal, and O. Gohlke, Optimierung von Müllfeuerungen mit hilfe von CFDmodellierung: Validierung an der HR-AVI Amsterdam in 25 Deutscher Flammentag, 2011

7.2 Gemeinsame Publikationen zweier oder mehrerer KW21 Teilprojekte

Gemeinsame Publikationen mit anderen KW21 Teilprojekten sind im Rahmen dieses KW21-Teilprojektes nicht entstanden.

7.3 Weitere Publikationen

- [10] EU-Kommission: Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien (2008)
- [11] C. Wünsch, Vermeidung von Treibgasemissionen durch Steigerung der Energieeffizienz deutscher Müllverbrennungsanlagen. Pirna: Eigenverl. Des Forums für Abfallwirtschaft und Altlasten, 1 ed., 2011.
- [12] R. Dräger, A. Seitz, O. Gohlke, und M. Busch, "Energieeffizienz und Kesselkonzepte," in Energie aus Abfall (K. J. Thomé-Kozmiensky und M. Beckmann, eds.), pp. 235–256, Neuruppin: TK Verlag, 2010.
- [13] R. Schu and R. Leithner, "Mehrstufige Dampfüberhitzung Effizienzsteigerung von Ersatzbrennstoff-, Biomasse- und Sloarthermiekraftwerken," in Energie aus Abfall (K. J. Thomé-Kozmiensky and M. Beckmann, eds.), Neuruppin: TK, 2008.
- [14] B. Kamuk, "Technical, economical, operating consequences by operating at extreme steam parameters," in WtERT Annual Meeting Europe 2010 (M. Jakuttis, ed.), 2010.



- [15] H.-P. Aleßio and M. Mück, "Möglichkeiten und Grenzen der Effizinzsteigerung in Abfallverbrennungsanlagen," in Energie aus Abfall (K. J. Thomé-Kozmiensky and M. Beckmann, eds.), pp. 117–148, Neuruppin: TK Verlag, 2010.
- [16] M. A. van Berlo and J. Wandschneider, Value from waste: Waste fired powerplant the new standard for recovery of sustainable energy, metals and building materials from urban waste. Amsterdam and The Netherlands: Afvalenergiebedrijf, the city of Amsterdam, 2006.
- [17] A. Bandilla, "Ersatzbrennstoffeinsatz in einem Industriekraftwerk mit hohem elektrischem Wirkungsgrad," in Energie aus Abfall (K. J. Thomé- Kozmiensky and M. Beckmann, eds.), pp. 501–512, Neuruppin: TK Verlag, 2006.
- [18] J. Wandschneider, "Netto-Wirkungsgrad elektrisch größer dreißig Prozent -Grundsätzliche Potentiale in Abfallverbrennungsanlagen," in Energie aus Abfall (K. J. Thomé-Kozmiensky and M. Beckmann, eds.), pp. 65–82, Neuruppin: TK Verlag, 2010.
- [19] Baumbach, G.: Luftreinhaltung. 1.Aufl. Berlin, 1990
- [20] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen – 17. BImSchV) (2009)
- [21] EUWID: Bundesministerium präsentiert ersten Arbeitsentwurf für neue 17. BImSchV, EUWID 27 (2011)
- [22] IFEU: "Beispielhafte Darstellung einer vollständigen, hochwertigen Verwertung in einer MVA unter besonderer Berücksichtigung der Klimarelevanz", UFOPLAN-Projekt FKZ 205 33 311, (2007), Heidelberg
- [23] L. Sørum, Ø. Skreiberg, P. Glarborg, A. Jensen, and K. Dam-Johansen,
 "Formation of NO from combustion of volatiles from municipal solid wastes," Combustion and Flame, vol. 124, no. 1-2, pp. 195–212, 2001.
- [24] K. M. Hafner, Untersuchung zur Bildung brennstoffabhängiger Stickoxide bei der Abfallverbrennung mittels on-line analytischer Messmethoden. PhD thesis, Technische Universität München, Munich, 2004.
- [25] H. Eberius, T. Just, and S. Kelm, "NO₂-Schadstoffbildung aus gebundenem Stickstoff in Propan-Luft-Flammen," VDI-Bericht, vol. Nr. 498, 1983
- [26] J. A. Miller and C. T. Bowman, "Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion," Progress in Energy and Combustion Science, vol. 15, no. 4, pp. 287–338, 1989.
- [27] T. Kolb, Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Minderung der NO_x-Emission technischer Feuerungen durch gestufte Verbrennungsführung. PhD thesis, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 1990.
- [28] H. Spliethoff, Power generation from solid fuels. Heidelberg [Germany] and and New York: Springer, 2010.
- [29] H. Spliethoff, Großtechnische Untersuchung der Stickstoffoxidminderung mit dem Schwerpunkt Brennstoffstufung an einer Schmelzkammerfeuerung. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1992.



- [30] R. Salzmann and T. Nussbaumer, "Fuel staging for NO_x-reduction in biomass combustion: experiments and modeling," Energy & Fuels, vol. 15, no. 3, pp. 575–582, 2001.
- [31] H. Maier, R. Spiegelhalder, A. Kicherer, H. Spliethoff, and I. Hägele, "Luftstufungstechniken am Brenner und im Feuerraum zur Minderung von NO_x-Emissionen in Kohlenstaubflammen," in VDI Berichte Nr. 992 (VDI, ed.), 1991.
- [32] O. Gohlke and R. Koralewska, "Feuerungstechnische Maßnahme zur NO_x -Reduzierung in Abfallverbrennungsanlagen - Very Low Nox-Verfahren," in Energie aus Abfall (K. J. Thomé-Kozmiensky and M. Beckmann, eds.), vol. 559-572, Neuruppin: TK, 2012.
- [33] M. A. van Berlo and P. Simoes, "High-efficiency waste-to-energy: Amsterdam's experiences after four years of operation," in Sardinia 2011 Symposium (R. Cossu, ed.), 2011.
- [34] H. Rüegg and G. Ziegler, "Dampferzeuger für überhitzten Dampf für Verbrennungsanlagen mit korrosiven Rauchgasen," 01.07.1999.
- [35] H. Hunsinger, "Verfahren und Vorrichtung zur Flugstrom-Sulfatierung von Rauchgasinhaltsstoffen," 2009.

7.4 Im Rahmen des Projektes entstandene Patente

Patente sind im Rahmen dieses KW21 Teilprojektes nicht entstanden.

8 Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses

8.1 Studentische Mitarbeiter

 U. Martin (Dipl.-Ing.) Programmierung einer Koppelsoftwar zwischen dem Brennstoffumsetzungsmodel und ANSYS Fluent Anpassung des Brennstoffumsetzungsmodels an den MARTIN Horizontalrost Unterstützung Messkampagne bei AEB Amsterdam
 S. Dürrschmidt (Dipl.-Ing.) Unterstützung Messkampagne bei AEB Amsterdam
 M. Angerer (M.Sc.) Optimierung der Koppelsoftware zwischen dem Brennstoffumsetzungsmodel und ANSYS Fluent Erarbeitung eines Auswertestandards
 8.2 Studien-. Semester- und Bachelorarbeiten

U. Martin (Dipl.-Ing.) Beschreibung der Brennstoffumsetzung im Brennbett von Rostfeuerungen

- S. Dürrschmidt (Dipl.-Ing.) Parameterstudie mit Brennstoffumsetzungsmodell und CFD-Simulation für die Müllverbrennung
- N. Böcker (Dipl.-Ing.) Entwicklung eines Modells zur Eindüsung von gasförmigen Medien in grobes CFD-Gitter



Effiziente Energieerzeugung aus Abfall

D. Francisco Bermudez (M.Sc.) Investigation of concepts for use of high temperature electrostatic precipitators in energy from waster plants
F. Schimpf (M.Sc.)	Implementierung eines erweiterten SNCR-Mechanismus in CFD
M. Becker (DiplIng.)	Untersuchung der Luftbefeuchtung und -vorwärmung in Müllverbrennungsanlagen mit Warmwasser aus der Abgaskondensation
S. Jell (DiplIng.)	Simulation der Wärmeübertragung in einer Müllverbrennungsanlage
M. Angerer (M.Sc.)	Implementierung und Reduktion eines detaillierten Chemiemodells zur Verbrennungsbeschreibung in CFD
8.3 Diplom- und M	lasterarbeiten
N. Vogl (M.Sc.)	Modellierung der Entstehung und Reduzierung von NO _x mit Computational Fluid Dynamics
N. Kaeding (DiplIng.)	Hybridkraftwerk Solar/Abfall: Erstellung und Beurteilung von Konzepten
U. Martin (DiplIng.)	Investigation of a new process for thermal treatment of waste based on gasification and post combustion
S. Dürrschmidt (DiplIng.)) Untersuchung von gestuften Verbrennungen in Bezug auf Schadstoffminimierung und Temperaturprofile
N. Böcker (DiplIng.)	Untersuchung der Abhängigkeit der Schlackequalität und Temperaturverteilung im Brennbett von der Feuerraumgeometrie eines Müllkessels.
T. Römer (M.Sc.)	Simulation von Flugaschepartikelbahnen in Müllverbrennungs anlagen
C. Kastner (M.Sc.)	Analyse des thermischen Verhaltens der Aschekomponenten mittels TGA - Versuch und thermodynamischen Berechnungen.
U. Friedrich (DiplIng.)	Untersuchung der Abhängigkeit der Schlackequalität und der Temperaturverteilung über dem Brennbett von der Feuerraumgeometrie eines Müllkessels.
8.4 Promotionen	

M.J. Murer Numerical methods for efficient power generation from municipal solid waste



9 Forschungsprogramme des Bundes und der EU

9.1 Angaben, ob weitere Drittmittel zum Projektthema eingeworben wurden, insbesondere aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen des Bundes und der EU

Keine weiteren Drittmittel wurden zum Thema dieses Projektes eingeworben.

9.2 Geplante Antragsstellung bzw. künftige Förderung aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen von Bund, EU etc. sowie allgemeinen Förderprogrammen (z.B. DFG)

Im Gegensatz zum Projektthema der primärseitigen NO_x-Minderung wurde zusammen mit dem Industriepartner ein Antrag mit dem Titel "Robuste und effiziente NO_x-Minderung mit Ammoniak" für Sekundärmaßnahmen zur NO_x-Minderung bei der Bayerischen Forschungsstiftung (BFS) eingereicht und zum 28.03.2012 bewilligt.



Arbeitskreis Kraftwerkssysteme und Dampferzeuger

Projekt: BY 07DE

Entwicklung und Charakterisierung innovativer nanokeramischer Funktionsschichten auf Precursorbasis für den Einsatz in Müllverbrennungs- und Biomasseverbrennungsanlagen als Korrosionsschutzsystem

Projektleiter:	Prof. DrIng. Uwe Glatzel Lehrstuhl Metallische Werkstoffe (MW) Universität Bayreuth						
	Dr. Günter Motz Lehrstuhl Keramische Werkstoffe (CME) Universität Bayreuth						
Mitarbeiter:	DrIng. Martin Günthner						
	Dr. rer. nat. Adelheid Schütz						
Finanzierung:	Bayrische Staatsministerien für Wissenschaft, Forschung und Kunst sowie für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie						
	EnBW Kraftwerk AG, 70173 Stuttgart						
	Clariant Produkte (Deutschland) GmbH, 65843 Sulzbach am Taunus						

1 Ausgangssituation

In Deutschland fallen jährlich ca. 380 Mio. Tonnen Abfälle an [7]. Das Deponieren von Abfällen ist nur noch bei Einhaltung bestimmter Grenzwerte erlaubt. Diese Grenzwerte können aber ausschließlich nach einer thermischen Behandlung der Siedlungsabfälle eingehalten werden. Anlagen zur thermischen Verwertung von Abfällen gewinnen weltweit an Bedeutung. In den Abfällen enthaltene Schadstoffe, welche sonst das Grundwasser verschmutzen, werden neutralisiert, teils oxidiert bzw. zerstört oder getrennt entsorgt, so dass eine gefahrlose Deponierung erfolgen kann [8]. Daher wird sich die Anzahl der Müllverbrennungsanlagen weiter erhöhen. Infolge der Bestrebung zur Reduzierung von CO₂-Emissionen kommt der Energiegewinnung aus Biomasse, also aus CO₂-neutralen Brennstoffen, wie Holz und Getreideabfällen, eine immer größer werdende Bedeutung zu.



Die bei der Müll- und Biomasseverbrennung anfallende Energie wird in Form von Wärme über ein Wärmetauschersystem zur Stromerzeugung genutzt. Die metallischen Verdampferrohre sowie Endüberhitzerflächen sind rauchgasseitig einer hohen korrosiven Belastung ausgesetzt. Neben der Hochtemperaturkorrosion durch aggressive Salzschmelzen, Gase oder Säuren werden die metallischen Bauteile ebenfalls durch die abrasive Partikelfracht im Rauchgas beansprucht. Gesetzliche Vorgaben zur Minimierung des Dioxinausstoßes sowie Forderungen zur Erhöhung des Wirkungsgrades führen zusätzlich zu weiter steigenden Temperatur- und Korrosionsbelastungen. Daher nehmen die Reparatur- und Instandhaltungskosten sowie die Ausfallzeiten zu [9].

1.1 Aufbau und Funktionsweise von Müll- und Biomasseverbrennungsanlagen

Am häufigsten sind derzeit Müllverbrennungsanlagen mit Rostfeuerung im Einsatz. Diese bestehen im Wesentlichen aus dem Müllbunker, der Müllaufgabe, dem Rost mit Feuerraum und Schlackeaustrag, dem Dampferzeugerbereich sowie der Abgasreinigung und Emissionskontrolle. Die Verweilzeit des Mülls im Ofen bei 850-1000°C dauert ein bis zwei Stunden, währenddessen organische Schadstoffe wie Dioxine und Furane zersetzt werden. Als Endprodukte entstehen Schlacke und Rauchgas. Die nachfolgenden Wärmetauscher dienen dazu, die thermische Energie des Rauchgases zur Dampferzeugung und damit zur Stromgewinnung zu nutzen. Aus Kosten- und Verarbeitungsgründen werden hier hauptsächlich niedriglegierte ferritische Stähle als Rohrmaterialien verwendet. Im Rauchgas befindliche Asche und Teile des Gases lagern sich auf den metallischen Wärmetauschern ab und bilden dort korrosionsfördernde Beläge, die zudem den Wärmeübergang herabsetzen. Auf diesen Wärmetauscherflächen (Verdampferrohre, Endüberhitzerflächen) sollen keramische Schutzschichten appliziert werden. Die Reste der Verbrennungsgase werden in nachfolgenden Schritten aufwendig gereinigt [10, 11].

Das Verbrennungs- und Energiegewinnungsprinzip von Biomasseverbrennungsanlagen ist mit denen von Müllverbrennungsanlagen vergleichbar. Chlor- und schwefelhaltige Schadstoffe aus der Biomasseverbrennung lassen sich im Rauchgas, der Asche sowie der Schlacke nachweisen und führen auch hier zu einer starken korrosiven Abzehrung der Wärmetauscherflächen. Es treten dabei ähnliche Korrosionsphänomene und -mechanismen wie bei der Müllverbrennung auf. Dies ist darin begründet, dass aufgrund der Belagsbildungsprozesse die anfänglich geringeren Chlor- und Schwefelgehalte im Rauchgas zu hohen Anteilen in den Belägen führen und entsprechende Korrosionsprozesse auslösen [12].

1.2 Korrosion in Müllverbrennungsanlagen

Im Bereich der Müllverbrennung wird unter Korrosion der chemische Angriff des Rauchgases und der mitgeführten Partikel auf die Rohrwände verstanden, was zu einem erhöhten Materialabtrag und zu vorzeitigem Versagen der betroffenen Bauteile führt. Die relevanten Korrosionsmechanismen stellen ein vielparametriges Problem dar, welches prinzipiell vom Design (verwendete Ofenmaterialien, Verbrennungs-, Rauchgas- und Dampftemperaturen) und den Anlagenbetriebsbedingungen (Müll- und Rauchgaszusammensetzung, Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit) abhängt. Die Mechanismen und Vorgänge, die hauptsächlich für den hohen Materialverlust verantwortlich sind, sind die Hochtemperatur-Chlor-Korrosion, die Salzschmelzen- und Gaskorrosion sowie die Downtime-Korrosion.



Beschleunigte und aktive Korrosion

Beschleunigte Korrosion tritt auf, wenn der unter günstigen Korrosionsbedingungen (das heißt bei Ausbildung einer riss- und porenarmen, verschleißhemmenden Schicht an der Bauteiloberfläche) zu erwartende Verschleiß übertroffen wird. Im Falle dieser beschleunigten Korrosion kommt es nicht zu einer Verlangsamung der Korrosionsvorgänge, da Chlor, Schwefel oder Sauerstoff die gebildete Schutzschicht durchdringen und so das Material stetig abgetragen wird. In den Ablagerungen mobile Verbindungen wie Chloride und Sulfate bewirken zudem einen Transportprozess der Ionen des metallischen Werkstoffes, welche an der Oberfläche zu Oxiden umgewandelt werden, so dass Chloride und Sulfate für einen erneuten Korrosionsangriff zur Verfügung stehen. Dieses Phänomen wird als aktive Korrosion bezeichnet. Weitere Ursachen für einen beschleunigten Verschleiß sind mechanische Spannungen. Durch einen Riss in der Schutzschicht kann ein an der Korrosion bisher unbeteiligtes Element an den metallischen Werkstoff gelangen und dort reagieren. Ein Aufreißen und Abplatzen der Schutzschicht ist dann die Folge [11]. Die aus den Forderungen nach besserer Wirtschaftlichkeit der Anlagen resultierenden hohen Temperaturen (Endüberhitzung des Dampfes über 400 °C) und Drücke (über 40 bar) begünstigen ebenfalls eine Beschleunigung der Korrosion [13].

Salzschmelzenkorrosion

Korrosion tritt auch bei Vorhandensein geschmolzener Salzmischungen auf. Hierbei bringen Salzschmelzen die jeweiligen Metalle – analog zu einem chemischen Metallaufschluss – in Lösung. Es können "high-temperature hot corrosion" (bei Temperaturen oberhalb des Schmelzpunktes der Salzmischung) und "low-temperature hot corrosion" (reduzierter Schmelzpunkt der Mischung durch entstehende Korrosionsprodukte) auftreten [11]. Der metallische Werkstoff wird durch die direkte Einwirkung eutektischer Schmelzen aus Chloriden und/oder Sulfaten aufgelöst. In den Belägen, welche sich auf den Wärmetauschern bilden, lagern sich rauchgasseitig Sulfate aus dem System $CaSO_4$ -Na₂SO₄-K₂SO₄-ZnSO₄-PbSO₄ und Chloride des Systems KCI-ZnCI₂ ab.

Ist in einer Salzschmelze ausreichend Sauerstoff gelöst, bilden sich zudem oxidische Phasen in den Belägen aus. Diese werden meist durch die Salzmischung aufgelöst bzw. aufgeschlossen. In Folge dessen kommt es zur Freisetzung von Gasen wie Schwefeloxide, Chlor oder Chlorwasserstoff, welche an die Metalloberfläche diffundieren und zu einer Sulfidierung bzw. Chlorierung der Materialbestandteile führen. Schwermetallhaltige Chloride und Sulfate bilden zudem niedrigschmelzende eutektische Phasen aus. Dies führt dazu, dass die Salzschmelzen bereits im Temperaturbereich der Endüberhitzer flüssig vorliegen [14]. Gelangt die chlorhaltige Schmelze mit dem eisenhaltigen Metall in Kontakt, wird dieses als Eisenchlorid in der Schmelze gelöst, was wiederum zu aktiver Korrosion führt.

Downtime-Korrosion

Die Downtime-Korrosion beschreibt den korrosiven Verschleiß der metallischen Bauteile während der Stillstandszeiten des Kessels. Auf den Wärmetauschern abgelagerte hygroskopische Salze nehmen Wasser aus der Umgebung auf, so dass sich diese in feuchte Beläge verwandeln und ein weiterer Korrosionsangriff stattfindet [15]. Die Downtime-Korrosion begünstigt auch nach einem erneuten Anfahren der Anlage die Korrosion durch die vorhandenen aggressiven Rauchgase und Salzschmelzen. Diese Verschleißart kann als beschleunigter, gleichmäßiger Abtrag der Materialoberfläche oder als Lochfraß auftreten.



Letzterer ist die Folge der lokalen Metallauflösung unter Resten von Korrosionsprodukten und Ablagerungen. Die Ausbildungszeit dieser Fehlstellen beträgt bei 65 °C Umgebungstemperatur nur wenige Minuten. Durch molybdänhaltige Stahlwerkstoffe lässt sich die Beständigkeit gegen die Downtime-Korrosion deutlich steigern [11]. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass hauptsächlich die Hochtemperaturkorrosion durch aggressive Salzschmelzen und Gase sowie die Downtime-Korrosion zu einer starken Materialabzehrung der metallischen Bauteile (mehrere mm/Jahr) in Biomasse- und Müllverbrennungsanlagen führen.

1.3 Maßnahmen zum Korrosionsschutz

Die Maßnahmen zum Korrosionsschutz in Müll- und Biomasseverbrennungsanlagen lassen sich einerseits in verfahrenstechnische bzw. konstruktive Eingriffe in den Verbrennungs- und Dampferzeugerprozess und andererseits in den Einsatz hochwertigerer, korrosionsbeständigerer Materialien als Konstruktions- oder Beschichtungswerkstoffe unterteilen. Verfahrenstechnische und konstruktive Maßnahmen zum Schutz der Ofenbauteile sind das Hinzugeben von Additiven wie MgO, CaO oder einer bestimmten Menge von Sulfaten in den Verbrennungsprozess. Diese sollen schädliche Verbindungen neutralisieren oder die Struktur der Ablagerungen derart ändern, dass es zu einer geringeren Belagskorrosion kommt. Weitere Schutzmaßnahmen sind das Festlegen von Grenzwerten korrosionsfördernder Elemente in der Müllzusammensetzung, eine konstante Ofenfeuerung unter Sauerstoffzugabe, der Einbau von Verkleidungen oder das Absenken der Dampftemperatur bzw. des Dampfdrucks [11, 16].

Als korrosionsbeständigere Konstruktionswerkstoffe werden metallische Rohre aus hochlegierten Edelstählen [17] oder Nickelbasislegierungen [18] sowie keramische Zustellungen und Auskleidungen auf Basis von SiC, Mullit, Korund und Si₃N₄ [19-21] verwendet. Nachteilig sind jedoch die hohen Materialkosten sowie die teilweise anspruchsvollen Verarbeitungsverfahren. Daher kommen derzeit hauptsächlich niedriglegierte ferritische Stähle als Materialien für die Wärmetauscher zum Einsatz. Als Beschichtungswerkstoffe werden hauptsächlich Nickelbasislegierungen verwendet [22], welche durch Auftragsschweißen (Cladding) [23] oder thermisches Spritzen [24] auf die korrosiv stark beanspruchten Wärmetauscherflächen aufgebracht werden. Nickelbasislegierungen sind jedoch teuer, führen zu einer hohen thermischen Belastung des Substrates während des Auftragsprozesses [25] und können nur bedingt zu Instandhaltungszwecken im Kessel eingesetzt werden.

Keramische Schutzschichten weisen im Vergleich zu metallischen Systemen eine höhere Korrosions-, Oxidations- und Verschleißbeständigkeit auf. Diese kommen derzeit als sogenannte Thermal Barrier Coatings oder Environmental Barrier Coatings im Bereich von Hochtemperaturapplikationen zur Anwendung. Neben ZrO₂ werden Mullit, Al₂O₃ oder Seltenerdenoxide als Beschichtungssysteme verwendet, welche durch thermische Spritzverfahren sowie PVD-Techniken (Physikalische Gasphasenabscheidung wie thermisches Verdampfen oder Sputtern) appliziert werden [26, 27]. Aus der Literatur sind weiterhin nanokeramische Schutzschichten auf Basis von Sol-Gel-Systemen bekannt [28]. Diese bestehen aus einer keramischen Bindematrix, welche mit anorganischen Partikeln funktionalisiert wird. Daher lässt sich das Materialsystem gezielt an die jeweiligen Korrosionsund Temperaturbedingungen anpassen. Die Schichtdicke von wenigen Mikrometern be-



wirkt zudem einen sehr guten Wärmeübergang. Nachteile liegen jedoch in der schlechteren Reproduzierbarkeit sowie der Restporosität der Schichten, so dass diese überwiegend als Antihaftbeschichtungen auf Wärmetauschern eingesetzt werden. Insgesamt lässt sich festhalten, dass aufgrund der komplexen Korrosionsbedingungen in Müll- und Biomasseverbrennungsanlagen bisher keine Schutzmaßnahme bzw. kein Schichtsystem existiert, welches alle Korrosionsprobleme vollständig löst [15].

1.4 Schutzschichten auf Basis von Precursoren

Eine Alternative zu den bereits etablierten Oberflächentechniken zur Erzeugung keramischer Schichten stellt die sogenannte Precursorroute dar. Die dabei verwendeten präkeramischen Polymere basieren überwiegend auf siliziumhaltigen Verbindungen, wobei Polysiloxane, Polycarbosilane und Polycarbosilazane am weitesten verbreitet sind [29]. Die Vorteile der Herstellung keramischer Schichten über die Precursorroute sind vor allem die Applizierbarkeit der Schichten über einfache Lackierverfahren wie Tauchen oder Sprühen, die niedrigen Keramisierungstemperaturen sowie deren hohe thermische und chemische Stabilität. Aufgrund der einfachen Applizierbarkeit ist daher eine Beschichtung auch komplexer Geometrien direkt im Kessel möglich. Den Hauptnachteil stellt die Schwindung der Precursoren während der Pyrolyse dar. Daher liegt die kritische Schichtdicke, bis zu der rissfreie Schichten möglich sind, bei wenigen um [30]. Durch die Verwendung geeigneter Füllstoffe sind dickere Schichten herstellbar. Es wird zwischen passiven Füllstoffen (SiC, Si₂N₄, BN, TiC, AlN, Al₂O₄, NbC), aktiven Füllstoffen (Ti, Cr, Fe, Al, Si, B, Nb, Hf, TiSi₄, CrSi,, MoSi,) oder Glasadditiven unterschieden [31]. Durch passive Füllstoffe wird der Anteil des Precursors und somit die Volumenschwindung reduziert. Bei aktiven Füllstoffen kommt es durch eine Reaktion des Additivs mit der Pyrolyseatmosphäre bzw. mit den Zersetzungsprodukten des Precursors sogar zu einer Expansion. Glasadditive, welche während der Pyrolyse erweichen bzw. aufschmelzen, führen zum Abdichten der Schichten. Stand der Technik stellen derzeit dichte Schichten mit Dicken bis ca. 20 µm dar. So konnten Labrousse et al. [32] und Torrey et al. [33] durch die Zugabe von Al₂O₂ bzw. TiSi₂ nach einer Auslagerung bei 800 °C rissfreie Precursorschichten mit Dicken zwischen 10 und 20 µm auf Stahl erreichen.

2 Projektziele

Das Hauptziel des Projektes bestand darin, ein innovatives Korrosionsschutzsystem für Müll- und Biomasseverbrennungsanlagen auf Basis präkeramischer Polymere (Precursoren) zu erarbeiten. Dies soll zu einer Reduzierung der Reparatur- und Instandhaltungskosten sowie der Ausfallzeiten der Anlagen beitragen. Hierzu mussten geeignete keramische Schichtsysteme für korrosiv stark beanspruchte Wärmetauscherflächen entwickelt, appliziert und charakterisiert werden. Die Entwicklung zielte dabei auf die Herstellung einer möglichst dicken (~ 100 μ m), gasdichten, fehlerfreien sowie gut haftenden Schicht ab. Hierzu wurden die nanokeramischen Precursorschichten mit Hilfe geeigneter Additive und Füllstoffe modifiziert und funktionalisiert. Die so entwickelten Beschichtungssuspensionen lassen sich über konventionelle Lackierverfahren auf die metallischen Wärmetauscherflächen applizieren und sind daher sowohl in Neuanlagen als auch als Reparaturkonzept für Bestandsanlagen geeignet.



Neben der Schichtentwicklung stellten die umfassende Charakterisierung der Schichtsysteme, die Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Schicht und Substrat sowie die Aufklärung der komplexen Korrosions- und Haftmechanismen einen wesentlichen Teil des Projektes dar. Hierzu wurden mikroskopische, spektroskopische und andere materialwissenschaftliche Untersuchungsmethoden eingesetzt. Zur Prüfung der Korrosionsbeständigkeit wurden geeignete Korrosionstests im Labormaßstab entwickelt, die mit Hilfe von Sondenversuchen in Müllverbrennungsanlagen optimiert wurden.

2.1 Umsetzung der Hinweise aus den bisherigen Begutachtungen

Keine Hinweise aus den bisherigen Begutachtungen

3 Vernetzung

3.1 Vernetzung innerhalb KW21

Mit den Forschern des Teilprojektes "Reduktion von Verschlackungstendenzen" (BW W 26 DE) wurden Modellrechnungen für Verschlackungen in der Müllverbrennungsanlage durchgeführt. Hierbei wurden die Parameter des für Kohlekraftwerke erstellten Rechenmodelles auf die in der Müllverbrennungsanlage auftretenden Ablagerungen angepasst. Es konnte so eine Prognose getroffen werden, ab wann sich an den Rohrwänden ausreichend Schlacke angelagert hat, um die Rohrwände vor Abrasion zu schützen. Darüber hinaus wurde mit den Bearbeitern des Projektes BY 6 DE ein gemeinsamer Sondenversuch in der MVA Coburg durchgeführt. Weiterhin fand eine enge wissenschaftliche Zusammenarbeit mit dem Projekt "Untersuchungen zum Einfluss der Dünnwandigkeit auf die mechanischen Hochtemperatureigenschaften verschiedener Nickelbasissuperlegierungen" (BY 10 GT) statt. Hierbei brachte die Kooperation in den Bereichen Mikrostrukturanalytik und insbesondere der Probenpräparation einen Erkenntniszugewinn.

Zudem wurde zum Teilprojekt "Brennstoffflexibles Gasanalysekonzept" des Arbeitskreises "Brennkammern für Gasturbinen" (BY 18 GV) eine Kooperation aufgebaut. Es wurden Abgasuntersuchungen in der Müllverbrennungsanlage durchgeführt, die einen Abgleich mit den im Kraftwerk routinemäßig durchgeführten Analysen erlauben. Dies kann die Einsatzgebiete des Gasanalysekonzeptes von Brennstoffen (z. B. Gaszusammensetzung und Heizwert von Erdgas) auf Bestandteile der Abgase von Müllverbrennungsanlagen (CO₂, SO₂, NO₂) erweitern.

3.2 Vernetzung außerhalb KW21

Im Bereich der Schichtentwicklung wurde mit den Arbeitsgruppen von Herrn Prof. Bordia (University of Washington, USA, gemeinsame Publikationen [2], [4]), Herrn Prof. Scheffler (Universität Magdeburg) sowie von Herrn Prof. Klein (University of Santa Catarina, Brasilien) zusammengearbeitet. Weiterhin ergaben sich externe Vernetzungen bei der Schichtcharakterisierung. So erfolgte mit Herrn Dr. Fabian Perez-Willard von der Carl Zeiss NTS GmbH die Untersuchung der Beschichtungssysteme an einem He-Ionenmikroskop. Zudem wurden mit Herrn Prof. Pöttgen von der Universität Münster (Mößbauerspektroskopie an Korrosionsprodukten), mit Herrn Prof. Winkelmann von der FH Lausitz (Abrasionstests) und mit Herrn Brugnara von der Arbeitsgruppe Oberflächentechnik der Universität Aachen (Haftung der Schichten) Kooperationen aufgebaut.



4 Vorgehensweise und Methodik

Für eine zielgerichtete und systematische Schichtentwicklung wurde der Einfluss aller wesentlichen Parameter wie des Beschichtungssystems (Precursor, Füllstoff, Dispergator, Lösungsmittel), der Substratvorbehandlung (Werkstoff, Geometrie, Reinigungsverfahren) sowie der Herstellungsparameter (Dispergierung, Applikation, thermische Auslagerung) auf die resultierenden Schichteigenschaften untersucht. Methodisch kam dabei das Konzept von Greil [31] zum Einsatz, das die Verwendung aktiver und passiver Füllstoffe zur Reduzierung der Precursorschwindung und somit zur Realisierung dickerer Schichten beinhaltet.

Die Charakterisierung ausgewählter Schichtsysteme erfolgte mittels Licht-, Stereo-, und Rasterelektronenmikroskopie, energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX), Glimmentladungsspektroskopie (GDOES), Röntgenbeugungsmessungen (XRD), Viskositätsmessungen, Thermoschockuntersuchungen, Gitterschnittverfahren und Härtemessungen. Zudem wurden geeignete Korrosions- und Verschleißtests entwickelt und durchgeführt, um die Diffusions-, Haftungs- und Korrosionsmechanismen zu untersuchen. Zur Evaluierung der Beschichtungen für deren Einsatz in Müllverbrennungsanlagen wurden weiterhin Sondenringe sowie Wärmetauscherrohre mit einer Länge von 2 m beschichtet und thermisch ausgelagert. Die Sondenringe und Rohre wurden in den Müllverbrennungsanlagen Stuttgart-Münster (Projektpartner EnBW) und Coburg eingebaut und getestet. In Abbildung 1 ist die Vorgehensweise schematisch dargestellt.





Abbildung 1: Schematische Darstellung zur Vorgehensweise

5 Projektergebnisse und Ausblick

5.1 Materialsysteme

Für die Entwicklung von Schutzschichten auf Precursorbasis wurden zunächst gemeinsam mit dem Projektpartner Clariant die präkeramischen Polymere ABSE [34], PHPS [35] und HTT1800 [36] ausgewählt, beschafft und teilweise modifiziert. Durch die Zugabe organischer Lösungsmittel ließen sich homogene Lösungen mit einstellbarer Viskosität (1,5 mPas bis ca. 100 mPas) sowie guter Handhabbarkeit und Stabilität an Luft herstellen.

Zur Realisierung dickerer Schichten nach dem Konzept von Greil [31] wurden verschiedene keramische (BN, Si₃N₄, SiC, ZrO₂, Al₂O₃, B₄C) und metallische Füllstoffe (Aluminiumflakes und -pulver) sowie Glasadditive (Schott 8470, 8472, G018-311, G018-198) ausgewählt, beschafft und charakterisiert. Durch die Zugabe von organischen Lösungsmitteln und Dispergatoren (z. B. Disperbyk[®]-2070) konnten nach geeigneter Dispergierung (meist US-Sonotrode und Rühren) der jeweiligen Pulver homogene Beschichtungssuspensionen erreicht werden. Um die Korrosionsbeständigkeit der Precursoren und Füllstoffe zu prüfen, wurden diese zu zylindrischen Tabletten verpresst, thermisch ausgelagert und in La-



borkorrosionstests untersucht (siehe auch Kapitel 5.4). Der oberflächliche Angriff durch das korrosive Salzgemisch war dabei sehr gering. Auf Basis dieser Laborkorrosionstests konnte nachgewiesen werden, dass sämtliche Precursorkeramiken und Füllstoffe in den Salzschmelzen nach einem einwöchigen Test bei 530 °C korrosionsstabil sind.

5.2 Verfahrensentwicklung

Als Substrate mussten verschiedene Stahlbleche, Sondenringe und Rohre mit einer Länge bis 2 m vorbehandelt, beschichtet und thermisch ausgelagert werden. Für die Wärmetauscher kommt beim Projektpartner EnBW Kraftwerk AG der niedriglegierte warmfeste Stahl 13CrMo4 zum Einsatz. Der Stahl 13CrMo4 ist im Ausgangszustand jedoch teilweise stark korrodiert und verunreinigt, sodass eine Vorbehandlung der metallischen Bauteile nötig ist. Die Untersuchung unterschiedlicher Vorbehandlungsverfahren zeigte, dass für die Herstellung gut haftender Schutzschichten das Sandstrahlen mit Glasperlen, eine anschließende Reinigung mit Aceton und die Applikation einer PHPS-Grundierung nötig sind. Das Aufbringen der Beschichtungen erfolgte mittels Rakel-, Tauch- und Sprühapplikation. Die verschiedenen Beschichtungssysteme mussten dabei u. a. durch das Einstellen der Konzentration oder des Füllstoffgehaltes rheologisch auf das jeweilige Beschichtungsverfahren abgestimmt werden. Zur Herstellung rissfreier Schichten musste auch jeweils die Schichtdicke angepasst werden. Für die Sprühapplikation wurde am Lehrstuhl Keramische Werkstoffe eine Kleinspritzkabine sowie ein Spritzapparat vom Typ "Mignon 3 HVLP" (Firma Krautzberger) aufgebaut. Nach der Schichtapplikation wurden die Schichten getrocknet und bei Temperaturen bis maximal 800°C im Kammer- bzw. Rohrofen an Luft ausgelagert. In Abbildung 2 ist die Verfahrensentwicklung für die Herstellung der Schichtsysteme auf Stahlblechen, Sondenringen und 2 m langen Rohren dargestellt.



Abbildung 2: Verfahrensentwicklung zur Herstellung und thermischen Auslagerung der Beschichtungen auf unterschiedlichen 13CrMo4-Bauteilen



5.3 Schichtentwicklung

Die Schichtentwicklung zielte auf die Herstellung möglichst dicker (bis 100 μ m), dichter, fehlerfreier und gut haftender Beschichtungen auf Wärmetauscherflächen ab. Die Herstellung der Schichten erfolgte dabei entsprechend der in Kapitel 4 diskutierten Vorgehensweise. Im Rahmen des Projektes wurde eine Vielzahl unterschiedlicher Schichten hergestellt, die hier nicht alle vorgestellt werden können. Der Entwicklungsfortschritt ist daher in Abbildung 3 beispielhaft dargestellt.



Abbildung 3: Schema zum Entwicklungsfortschritt bei der Schichtherstellung

Ausgehend von ungefüllten Precursorschichten mit Dicken von 1 bis 3 µm konnten durch die Zugabe von passiven Füllstoffen wie BN oder Si₃N₄ bis zu 30 µm dicke Schichten erreicht werden. Diese zeichnen sich durch gute Antihafteigenschaften aus, da sie von Metall- und Glasschmelzen kaum benetzt werden.

Durch die Verwendung von Glasadditiven lässt sich die Dichtigkeit und Dicke der Schichten weiter steigern. Aufgrund der höheren thermischen Beständigkeit und des angepassten thermischen Ausdehnungskoeffizienten kamen dabei hauptsächlich die Systeme G018-311 und 8470 als Glasadditive zum Einsatz. In Abbildung 4 ist ein optimiertes Schichtsystem gezeigt. Dieses setzt sich aus einer dünnen Polysilazangrundierung und einer glaskeramischen Schicht bestehend aus HTT1800 als Precursor, 8470 und G018-311 als Glasadditive sowie ZrO_2 als passiver Füllstoff zusammen. Anhand der Querschnittaufnahmen ist zu erkennen, dass das Schichtsystem dicht, homogen und gut haftend ist. Weiterhin liegt eine homogene Verteilung der ZrO_2 -Partikel innerhalb der amorphen glasgefüllten Precursorkeramikphase vor. Durch Verwendung von Glasadditiven und keramischen Füllstoffen lassen sich rissfreie Schichten mit einer Dicke von bis zu 100 µm erzielen.



Nanokeramische Funktionsschichten auf Precursorbasis als Korrosionsschutz für Müll- und Biomasseverbrennungsanlagen



Abbildung 4: Aufnahme eines glaskeramischen Schichtsystems (20 vol.% HTT1800, 25 vol.% ZrO₂, 27,5 vol.% G018-311, 27,5 vol.% 8470) auf 13CrMo4; Auslagerung 700 °C für 1 h an Luft [2]

Auf Basis dieser glaskeramischen Precursorschichten wurden weitere Modifizierungen durchgeführt. So konnte durch die zusätzliche Verwendung von Al_2O_3 als passiver Füllstoff die Schichthärte gesteigert werden. Die bimodale Partikelgrößenverteilung der keramischen Pulver (D_{50} von ZrO_2 : 0,6 µm; D_{50} von Al_2O_3 : 5 µm) ermöglicht zudem eine Erhöhung des passiven Füllstoffanteils (siehe Abbildung 5 a).

Weiterhin wurden durch die Kombination der glas- und nitridgefüllten Systeme Dreifachschichten entwickelt (siehe Abbildung 5 b). Hier ermöglicht der Mehrschichtaufbau eine Funktionstrennung: Die PHPS-Grundierung verbessert die Haftung des Schichtsystems, die glasgefüllte Keramikschicht sorgt für die nötige Dichtigkeit und die nitridgefüllte Schicht zeigt Antihafteigenschaften gegenüber reaktiven Schmelzen.



Abbildung 5: REM-Aufnahmen von glaskeramischen Precursorschichten auf Stahl 13CrMo4, jeweils bei 700 °C für 1 h an Luft ausgelagert; a) Verwendung von ZrO₂ und Al₂O₃ als passive Füllstoffe; b) Dreifachschichtaufbau mit Si₃N₄-gefüllter Funktionsschicht



5.4 Laborkorrosionstests, Vergleichbarkeit mit den Bedingungen in Müllverbrennungsanlagen (Korrosionsraten und -produkte)

Zunächst sollten valide "Schnelltests" erarbeitet werden, um die entwickelten Beschichtungssysteme zeitnah auf ihre Eignung als Korrosionsschutz für Verdampfer und Endüberhitzer in MVAs zu prüfen. Die Laborkorrosionsversuche wurden in Salzschmelzen mittels geschlossener Tiegel durchgeführt. Die Ausgangszusammensetzung des Salzgemenges ist in Tabelle 1 aufgelistet (Testdauer: 168 h, Temperatur: 530 °C).

Bestandteile Salzgemenge	NaCl	Na ₂ SO ₄	KCI	K2SO4	ZnCl ₂	ZnSO ₄
gew.%	19,0	22,8	24,7	28,5	2,5	2,5
Gasatmosphäre über Salzschmelze	N ₂	0 ₂	H ₂ O	SO ₂	HCI	
vol.%	71,2	18,2	10,0	0,02	0,08	

Tabelle 1: Zusammensetzung des Salzgemenges in Laborkorrosionstests

Die Laborkorrosionstests wurden im Hinblick auf die durch sie hervorgerufene Korrosionsrate und die für die Korrosion relevanten Elemente optimiert. Um die Korrosionsrate im potentiellen Einsatzbereich der Müllverbrennungsanlage zu ermitteln, kam ein Sondenkopf mit vier Probenringen aus dem Stahl 13CrMo4 zum Einsatz (siehe Abbildung 6, links). Dazu wurde ein Sondenabschnitt mit zwei Ringen der korrosionsstabilen Inconel686-Legierung im Laserauftragsschweißprozess versehen (siehe Abbildung 6, rechts). Diese Inconel686-Ringe dienen als Markierung für die ursprüngliche Stahloberfläche der Probe vor dem Einbau in die Müllverbrennungsanlage. Die durch eine innere Wasserkühlung eingestellte Temperatur an der Oberfläche der Probenringe lag bei 530°C. Nach einer zweiwöchigen Auslagerung im Kraftwerk wurde anhand metallographischer Querschliffe ein Korrosionsverlust von 350-450 µm ausgehend von der Probenoberfläche gemessen.



Abbildung 6: Sondenkopf mit 4 unterschiedlichen Ringproben (links); Probe IV mit Inconel686-Ringen zur Bestimmung der Korrosionsrate (rechts)

Nanokeramische Funktionsschichten auf Precursorbasis als Korrosionsschutz für Müll- und Biomasseverbrennungsanlagen



Bei einem linearen Verlauf der Korrosion entspricht dies einer Korrosionsrate von 12000 µm/Jahr. Nach Angaben des Projektpartners EnBW stimmen diese Werte mit anderweitig im Bereich der Überhitzer gemessenen Korrosionsraten überein. Eine ebenso präparierte Ringprobe (siehe Abbildung 6, rechts) wurde in Laborkorrosionstests untersucht. Dabei kam zunächst das Gemenge entsprechend Tabelle 1 zum Einsatz. Später wurden zum Abgleich der Korrosionsraten noch weitere korrosive Elemente zugesetzt bzw. die Versuchsdauer variiert. Es zeigte sich, dass sich die Korrosionsrate in den Laborversuchen durch die Zugabe von HCI und vor allem von FeCI₃ anpassen lässt (siehe Abbildung 7).



Abbildung 7: Korrosionsraten in verschiedenen Laborkorrosionstests

Die getesteten Sondenringe waren mit stark haftenden Ablagerungen belegt. Diese Ablagerungen beginnen bei 600 °C aufzuschmelzen und werden bei Temperaturen über 1100 °C oxidiert. Mittels ICP-OES konnten die in Tabelle 2 aufgelisteten Elemente in den Sondenbelägen nachgewiesen werden. Die Halogenidkonzentration ließ sich mittels ICP/OES nicht ermitteln. Abweichend vom Salzgemenge der Laborkorrosionstests (Tabelle 1) tritt hier eine hohe Silikatkonzentration auf.

С	;	A	J	E	3	В	а	E	Bi		Са		Cd		r		Cu		Fe	Ga		In		К			
0,0	0,04 32000 5500 3300		4	1	135000		12	20	900		1000			17000	110		50		77000								
Ag	С	0	L	.i	М	lg	М	n	n Na		a Ni		i F		PI			s		i	S	Sr	Ti		Zn		
40	4	0	16	60	110	000	85	50	72000		0 450		000 45		60 63		7(00 1040		000	570	00 3		00	950	0	17000

Tabelle 2: Mittlere Elementkonzentrationen in den Sondenbelägen in ppm



Der Vergleich der mit XRD gemessenen Phasen zeigt, dass die Beläge der Laborkorrosionstests und der Sondenversuche eine ähnliche Zusammensetzung haben. Auf eine Zugabe von Pb zum Salzgemenge der Laborkorrosionstests wurde verzichtet, da Pb in den Belägen der Sondenringe nur in sehr niedriger Konzentration nachgewiesen wurde.

Untersuchungen an Stahlproben nach den Laborkorrosionstests mittels geätzter Querschliffe zeigten, dass es hauptsächlich an den Korngrenzen des α -Ferrits zu Korrosion kommt. Dabei wird der Perlit-Anteil des Metallgefüges durch die Salzschmelzen oxidiert und aufgelöst. An der ehemaligen Probenoberfläche verbleiben lediglich die Körner des α -Ferrits. Dies ist auch bei der unbeschichteten Probe aus dem Sondenversuch der Fall, was auf ähnliche Korrosionsmechanismen schließen lässt. Ähnliche bzw. die gleichen chemischen Verbindungen und Phasen wurden in den korrodierten Schichten auf dem Sondenring und auf unbeschichteten 13CrMo4-Proben nach den Laborkorrosionstests detektiert. EDX-Messungen belegen zudem, dass sich die Korrosionsschicht neben Eisenoxiden, -sulfaten und -chloriden mit Chrom und Molybdän anreichert.

Eine wichtige Erkenntnis aus den Sondenversuchen war der erhebliche Einfluss der mechanischen Beanspruchung durch abrasive Partikel im Rauchgas. Die Schichten müssen also nicht nur thermisch und chemisch stabil sowie gasdicht sein, sondern auch eine sehr gute Haftung und Abrasionsbeständigkeit aufweisen. Daher wurden neben den Korrosionsuntersuchungen auch Abrasionstests durchgeführt.

5.5 Charakterisierung der Schichtsysteme

Die Charakterisierung der nanokeramischen Schutzschichten erfolgte begleitend zur Schichtentwicklung. So konnte u. a. gezeigt werden, dass durch die Verwendung von Glasfüllstoffen der Aufbau kompakter und ausreichend dicker Schichtsysteme möglich ist. Durch die Optimierung der thermischen Auslagerungsparameter ließen sich die Größe und Menge an Gaseinschlüssen innerhalb der Schichten minimieren. Weiterhin wurde eine GDOES-Methode zur Analyse von glasgefüllten Precursorschichten entwickelt und kalibriert. GDOES-Messungen sind methodenbedingt nur an gasdichten Schichten möglich. Daher erweist sich diese Messmethode als zuverlässiger Schnelltest für die Gasdichtigkeit der Beschichtungen.

In Kooperation mit der Arbeitsgruppe von Herrn Prof. Ralf Winkelmann (FH Lausitz) wurden zudem Abrasionstests unter kraftwerksrelevanten Bedingungen durchgeführt. Die glasgefüllten Beschichtungen, welche ZrO_2 und Al_2O_3 als passive Füllstoffe enthalten (siehe Abbildung 5 a), wiesen dabei unter allen untersuchten Proben den geringsten abrasiven Verschleiß auf (Massenverlust von 2,3 mg bei Einsatz von 1 kg Abrasivpartikeln) [5].

5.6 Diffusions- und Haftungsmechanismen zwischen Beschichtung und Substrat

Die Haftung der Schichten wurde u. a. mittels Ritztest (Scratchtest ASTM C1624) untersucht. Auf Basis der Tests konnte die Schichthaftung berechnet werden. Diese beträgt für die glasgefüllten Precursorschichten auf dem Stahl 13CrMo4 ca. 440 MPa und auf dem Edelstahl 1.4301 in etwa 550 MPa.



Nanokeramische Funktionsschichten auf Precursorbasis als Korrosionsschutz für Müll- und Biomasseverbrennungsanlagen

Die sehr gute Haftung der Schichten ist in der Diffusion von Elementen der Beschichtung und des Substrates an der Grenzfläche begründet (siehe Abbildung 8, links). Weiterhin konnte auch das Einwachsen von nadelartigen Metalloxiddendriten in das gefüllte Schichtsystem unter anderem mit einem He-Ionenmikroskop beobachtet werden (siehe Abbildung 8, rechts).



Abbildung 8: Diffusion von Elementen an der Grenzfläche zwischen Schicht und Stahlsubstrat (links); He-Ionen-Mikroskopaufnahme an der Grenzfläche (rechts) [5]

5.7 Abgleich Korrosionsverhalten und Beschichtungseigenschaften

Eine Vielzahl der entwickelten Schichtsysteme wurde mittels der Korrosionstests untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass die ungefüllten und nitridgefüllten Precursorschichten die Stähle nicht ausreichend vor Korrosion in Salzschmelzen schützen. Ein besseres Ergebnis ließ sich mit den optimierten glaskeramischen Schichtsystemen erzielen. So konnte nachgewiesen werden, dass es beim Vorliegen von Fehlstellen wie Abplatzungen, Rissen oder nicht beschichteten Oberflächenbereichen zu lokaler Korrosion kommt (siehe Abbildung 9, links). Fehlerfreie glaskeramische Schichtsysteme mit einer geschlossenen Porosität und einer ausreichenden Schichtdicke zeichnen sich jedoch durch eine sehr gute Korrosionsschutzwirkung in Salzschmelzen aus (siehe Abbildung 9, rechts).



Abbildung 9: REM-Aufnahmen von glaskeramischen Precursorschichten auf Stahl 13CrMo4 nach Laborkorrosionstests (Salzschmelze, 530 °C, 1 Woche); lokale Korrosion im Kantenbereich (links); keine Korrosion bei fehlerfreier Schicht (rechts)

5.8 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass im Rahmen des Forschungsprojektes ein innovatives Korrosions- und Abrasionsschutzsystem auf Basis nanokeramischer Precursorschichten entwickelt wurde. Hierzu wurde eine Verfahrensroute zur Applikation und thermischen Auslagerung der Schichten erarbeitet, die Schichteigenschaften umfangreich charakterisiert, Korrosions- und Abrasionstests entwickelt und durchgeführt sowie die keramischen Schichten mittels Sonden- und Rohrproben in Verbrennungsanlagen evaluiert. Es konnten dichte, gut haftende, ca. 100 µm dicke sowie thermisch, chemisch und mechanisch beständige Schichtsysteme auf Basis gefüllter Precursoren entwickelt werden. Derartige Schichten weisen ein großes Potential zum Schutz von Wärmetauscherflächen in Müll- und Biomasseverbrennungsanlagen auf.

Auf Basis der Ergebnisse ergeben sich weitere Ansatzpunkte für zukünftige Forschungsarbeiten. So sollte die Erarbeitung eines Reparaturkonzeptes mit der Applikation der Beschichtungen in Bestandslagen noch weiter und intensiver verfolgt werden. Auch im Bereich der Verfahrensentwicklung besteht noch weiterer Forschungsbedarf. Hier sollten die Beschichtung komplexer und großer Bauteile wie kompletter Rohrbündelsegmente oder alternative Technologien zum Aushärten der Schichten – z. B. beim Hochfahren in der Anlage oder durch induktives Härten – untersucht werden. Aufgrund der vielversprechenden Ergebnisse sollte zukünftig auch geklärt werden, inwieweit sich die Schichtsysteme auf Precursorbasis für andere Anwendungsgebiete mit hoher thermischer oder korrosiver Beanspruchung der Bauteile wie bei konventionellen Kraftwerken, in Abgasanlagen oder für Anwendungen in der chemischen Industrie eignen.

6 Wesentliche terminliche und inhaltliche Abweichungen zum Projektantrag

Die im Projektantrag beschriebenen Meilensteine und Arbeitspakete wurden inhaltlich und terminlich zum größten Teil eingehalten und bearbeitet. Auch die im Antrag dargestellte Vorgehensweise erwies sich als angemessen, praktikabel und realistisch. Eine kleine Änderung bzw. Ergänzung beim Vorgehen bestand in der größeren Gewichtung der Abra-
sionsuntersuchungen, da die Verschleißbeständigkeit der Beschichtungen bei Temperaturen über 500 °C eine wichtige Eigenschaft darstellt.

Lediglich für den Meilenstein 1 (MW, Abgleich von Laborkorrosionstests mit Sondenversuchen) gab es eine Zeitplanabweichung. Dies ist darin begründet, dass die zunächst entwickelten nanokeramischen Schichtsysteme keinen ausreichenden Korrosionsschutz in den Laborkorrosionstests zeigten. Da die Sondenversuche sehr aufwendig und teuer sind, wurden diese auf einen späteren Zeitpunkt verschoben, um weiter optimierte Beschichtungssysteme unter realen Anlagenbedingungen zu prüfen. Die ersten Sondenversuche fanden daher erst 20 Monate nach Projektbeginn statt. Im Anschluss konnten die Laborkorrosionstests verifiziert und angepasst werden.

Auch bei den Meilensteinen "Applikation und Evaluierung" sowie "Reparaturkonzept" (Meilensteine 6 und 7, CME) mussten aufgrund terminlicher Vorgaben seitens des Anlagenbetreibers und aufgrund des großen Arbeitsumfangs Einschränkungen in Kauf genommen werden. So konnten die Rohrabschnitte nicht – wie beim Reparaturkonzept vorgesehen – vor Ort in den Bestandsanlagen beschichtet und beim Hochfahren der Anlage ausgehärtet werden. Die Beschichtungen wurden stattdessen an der Universität Bayreuth appliziert, in verschiedenen Öfen thermisch ausgelagert und die beschichteten Bauteile anschließend in die Anlagen eingebaut und getestet.

7 Publikationen und Patente

7.1 Im Rahmen des Projektes entstandene Publikationen

7.1.1 Begutachtete Publikationen

- [1] Günthner, M.; Kraus, T.; Decker, D.; Krenkel, W.; Motz, G.: Polysilazane-based composite coatings on steel. High temperature ceramic materials and composites, Editors: W. Krenkel, J. Lamon, Proceeding of 7th international conference on high temperature ceramic matrix composites (HT-CMC 7), Bayreuth (2010), S. 681-687
- [2] Günthner, M.; Schütz, A.; Glatzel, U.; Wang, K.; Bordia, R. K.; Greißl, O.; Krenkel, W.; Motz, G.: High performance environmental barrier coatings, part I: passive filler loaded SiCN-system for steel. J. Eur. Ceram. Soc. (2011), 31, S. 3003-3010
- [3] Langhof, N.; Spatz, C.; Günthner, M.; Voigt, R.; Motz, G.; Krenkel, W.: Steigerung der Effizienz durch hochtemperaturbeständige keramische Beschichtungen und Verbundwerkstoffe. In: Tagungsband zur VDI Fachkonferenz "Werkstoffe in der Kraftwerkstechnik", Deutschland, ISBN 978-3-942980-75-3 (2011), S. 121-138
- [4] Günthner, M.; Wang, K.; Bordia, R. K.; Motz, G.: Conversion behaviour and resulting mechanical properties of polysilazane-based coatings. J. Eur. Ceram. Soc. (2012), 32 [9], S. 1883-1892
- [5] Schütz, A.; Günthner, M.; Motz, G.; Greißl, O.; Glatzel, U.: Characterisation of novel precursor derived ceramic coatings with glass filler particles on steel substrates. Surf. Coat. Technol. (2012), 207, S. 319-327



7.1.2 Nicht-begutachtete Publikationen

 Schütz, A.; Günthner, M.; Katzmann, T.; Eisinger, E.; Motz, G.; Greißl, O.; Käß, M.; Glatzel, U.: High temperature corrosion tests with ceramic-coated steel (eingereicht)

7.2 Gemeinsame Publikationen zweier oder mehrerer KW21 Teilprojekte

Es sind keine gemeinsamen Publikationen entstanden.

7.3 Weitere Publikationen

- [7] Bundesumweltamt: Abfallbilanz 2007. Statistisches Bundesamt (2010)
- [8] Hempel, H.; Müller, M.: Anlagen zur Verbrennung und mechanisch-biologischen Behandlungen von Siedlungsabflällen. Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (2003)
- [9] Bendix, D.: Stand und Perspektiven des Korrosionsschutzes in Anlagen zur regenerativen Eniergieerzeugung. Verfahren und Werkstoffe für die Energietechnik Band 2, M. Faulstich, D. Bendix, Sulzbach-Rosenberg (2006), S. 9-24
- [10] http://www.mva-hamm.de/Die-MVA/Virtueller-Rundgang/139817,1031,139406,-1. aspx (2010): MVA Hamm Betreiber- GmbH
- Schroer, C.; Konys, J.: Rauchgasseitige Hochtemperatur-Korrosion in Müllverbrennungsanlagen – Ergebnisse und Bewertung einer Literaturrecherche.
 Forschungszentrum Karlsruhe (2002)
- [12] [Spiegel, W.; Herzog, T.; Jordan, R.; Magel, G.; Müller, W.; Schmidl, W.: Korrosion durch Einsatz von Biomasse- und Ersatzbrennstoffen: Bedarf für belagsgestützte Korrosionskenngrößen. Energie aus Abfall, Band 2, Neuruppin: TK Verlag (2007)
- [13] Beckmann, M.; Krüger, S.; Gebauer, K.; Pohl, M.; Spiegel, W.; Müller, W.: Methoden der Korrosionsdiagnose bei der Verbrennung schwieriger Brennstoffe. Energie aus Abfall (2009), Band 6, Neuruppin: TK Verlag, S. 443-460
- [14] Spiegel, M.: Korrosionsmechanismen in Müllverbrennungsanlagen. VGB Konferenz, Essen (2000)
- [15] Spiegel, W.; Herzog, T.; Magel, G.; Müller, W.; Schmidl, W.: Corrosion in boilers with difficult fuels. Power Plant Chemistry (2011), 13 [5], S. 281-293
- [16] Wright, I. G.; Krause, H. H.: Assessment of factors influencing boiler tube lifetime in waste-fired steam generators: New opportunities for research and technology development. The American Society of mechanical Engineers (1996), ASM Research Report CRTD-Vol. 38
- [17] Schroer, C.: Entwicklung neuer Werkstoffe zur Verlängerung der Standzeit von Wärmetauschern in Müllverbrennungsanlagen. Bericht aus Umwelttechnik, Shaker Verlag, Aachen (2001)



- [18] Kawahara, Y.; Nakamura, M. et al.: Evaluation of new corrosion-resistant super heater tubing in high-efficiency waste-to-energy plants. Corrosion (1998), 54 [7], S. 576-589
- [19] Dietrichs, P.: Ceramic linings for waste incinerators. Part 2, cfi/Berichte DKG (1991), Band 68 [7/8], S. 346-350
- [20] Hohmann, U.: Korrosionsmechanismen an Feuerfestmaterialien aus Müllverbrennungsanlagen. VGB Power Tech (2007), Band [4], S. 99-103
- [21] Tonessen, T.; Breuers, M.; Telle, R.: Einfluss von Bindungsart und Mikrostruktur auf Oxidationsbeständigkeit von feuerfesten Auskleidungen auf SiC-Basis in Wasser-Dampf-Atmosphäre. VGB Power Tech (2005), Band 3, S. 80-84
- [22] Krause, H. H.; Wright, I. G.: Boiler tube failures in municipal waste-to-energy plants. Materials Performance (1996), 35 [1], S. 46-54
- [23] Manzke, A.: Korrosionsschutz mittels Schweißplattierung ein etabliertes Verfahren mit neuen Perspektiven. Verfahren und Werkstoffe für die Energietechnik Band 2, M. Faulstich, D. Bendix, Sulzbach-Rosenberg (2006), S. 145-164
- [24] Krömmer, W.: Korrosionsschutz durch thermisches Spritzen ein Verfahren mit Potential. Verfahren und Werkstoffe für die Energietechnik, M. Faulstich, D. Bendix, Sulzbach-Rosenberg (2006), Band 2, S. 165-174
- [25] Bach, F.-W.; Möhwald, K.; Laarmann, A.; Wenz, T.: Moderne Beschichtungsverfahren. Wiley Verlag, Weinheim (2005)
- [26] Kollenberg, W.: Technische Keramik. Vulkan-Verlag, Essen (2004)
- [27] Cao, X. Q.; Vassen, R.; Stoever, D.: Ceramic materials for thermal barrier coatings. J. Eur. Ceram. Soc. (2004), 24, S. 1-10
- [28] Meyer, F.; Faber, S.; Novy, A.: Nanocomp PP: Nanokeramische Schutzschichten für Kraftwerke im Praxistest. VGB PowerTech (2006), S. 131-135
- [29] Bill, J.; Aldinger, F.: Precursor-derived covalent ceramics. Adv. Mater (1995), 7, S. 775-787
- [30] Kroke, E.; Li, Y.-L.; Konetschny, C.; Lecomente, E.; Fasel, C.; Riedel, R.: Silazane derived ceramics and related materials. Mater. Sci. Eng. (2000), R26, S. 97-199
- [31] Greil, P.: Active-filler-controlled pyrolysis of preceramic polymers. J. Am. Ceram. Soc. (1995), 78, S. 835-848
- [32] Labrousse, M.; Nanot, M.; Boch, P.; Chassagneux, E.: Ex-polymer SiC coatings with Al2O3 particulates as filler materials. Ceram. Int. (1993), 19, S. 259-267
- [33] Torrey, J. D.; Bordia, R. K.: Processing of polymer-derived ceramic composite coatings on steel. J. Am. Ceram. Soc. (2008), 91 [1], S. 41-45
- [34] Motz, G.; Hacker, J.; Ziegler, G.: Special modified silazanes for coatings, fibers and CMC's. Ceram. Eng. Sci. Proc. (2000), 21 [4], S. 307-314
- [35] Isoda, T.; Kaya, H.; Nishii, H.; Funayama, O.; Suzuki T.; Tashiro Y.: Perhydropolysilazane precursors to silicon nitride ceramics. J. Inorg. Organomet. Polym. (1992), 2, S. 151-160
- [36] Herstellerangaben Clariant Produkte GmbH (2011)



7.4 Im Rahmen des Projektes entstandene Patente

Patente sind im Rahmen dieses KW21 Teilprojektes nicht entstanden.

8 Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses

8.1 Studentische Mitarbeiter

R. Mertel	Applikation von Beschichtungen mittels Tauch- und Sprühverfah- ren, Unterstützung bei der Schichtentwicklung (DiplIng. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik)
K. Dittmann	Thermische Auslagerung der Schichtsysteme, Unterstützung bei der Entwicklung glasgefüllter Schichtsysteme (Bachelor Materialwissenschaft)
C. Günzel	Vorbereitung von Blech- und Rohrproben, Probenpräparation, Untersuchung von Rückständen nach Korrosionstests (Bachelor Wirtschaftsingenieur)
T. Katzmann	Probenpräparation, Korrosionstests (Berufliche Bildung Metalltechnik)
A. Pancholi	Unterstützung bei der Schichtcharakterisierung (Praktikum)

8.2 Studien-, Semester- und Bachelorarbeiten

P. Barnstein	Weiterentwicklung aluminiumhaltiger Precursorkomposite für Beschichtungsanwendungen
K. Dittmann	Entwicklung neuartiger glasgefüllter Polysilazanschichten
T. Katzmann	Korrosionstests an beschichteten Stahlproben
E. Eisinger	Hochtemperaturkorrosion von Stählen in gasförmigen Medien und Salzschmelzen
L. Bialucha	Langzeitstabilität von Grenzflächen zwischen Stahl und precur- sorbasierten Beschichtungen bei hohen Temperaturen
R. Mertel	Herstellung eines Funktionsschichtsystems mit Antihafteigen- schaften auf Precursorbasis

8.3 Diplom- und Masterarbeiten

M. Hecht Entwicklung gefüllter Schichten auf Precursorbasis für den Oxidations- und Korrosionsschutz von Kraftwerksanlagen

8.4 Promotionen

Im Rahmen des KW21 Teilprojektes wurde keine Promotion angefertigt.



9 Forschungsprogramme des Bundes und der EU

9.1 Angaben, ob weitere Drittmittel zum Projektthema eingeworben wurden, insbesondere aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen des Bundes und der EU

- BMBF 03X3529C: "Ressourceneffiziente faserummantelte Stahlrohre für Höchsttemperaturanwendungen (Compoundrohre)"
- EU FP7-PEOPLE-2010 ITN: "FUNEA Functional Nitrides for Energy Applications"
- BMWI 50RN1105: "Flexible CIGSe Dünnschichtsolarzellen für die Raumfahrt PIPV2"

9.2 Geplante Antragsstellung bzw. künftige Förderung aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen von Bund, EU etc. sowie allgemeinen Förderprogrammen (z. B. DFG)

Derzeit keine Antragsstellung bzw. Förderung aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen



Arbeitskreis Kraftwerkssysteme und Dampferzeuger

Projekt: BW L 25DE

Untersuchung der flammlosen Oxidation zur schadstoffarmen und effizienten Verbrennung von Kohlestaub in Kraftwerken

Projektleiter:	Prof. Dr. techn. Günter Scheffknecht Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) Universität Stuttgart
Mitarbeiter:	DiplIng. Dragisa Ristic
Finanzierung:	Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg

1 Ausgangssituation

Weltweit wird die Flammlose Oxidation (FLOX[®]) häufig mit der High Temperature Air Combustion (HiTAC) oder mit der Intensive Low Oxygen Dilution (MILD) Verbrennung gleichgesetzt. Sowohl die FLOX[®]-als auch die HiTAC- oder die MILD- Technologie wurden für die Verbrennung gasförmiger Brennstoffe entwickelt und zeichnen sich durch sehr niedrige NO_x-Emissionen und erhebliche Energieeinsparungen aus. Das wesentliche Merkmal ist die Oxidation von Brennstoff in einer hochgradig verdünnten Atmosphäre. Die erreichte Verteilung von Brennstoff und Oxidant auf ein großes Volumen verhindert die Entstehung einer sichtbaren Flammenfront und bewirkt ein homogenes Temperaturprofil. Neuerdings ist die Anwendung dieser Verbrennungstechnologien auch für feste fossile Brennstoffe wie Kohlenstaub von Interesse.

Im HiTAC- als auch im MILD-Verbrennungskonzept wurde in den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts vorgewärmte Verbrennungsluft auf hohem Temperaturniveau vorausgesetzt. Jedoch stellte sich heraus, dass die Luftvorwärmung keine notwendige Bedingung ist. Kumar et al. [2] haben gezeigt, dass MILD-Verbrennung ohne Luftvorwärmung erreicht werden kann, wenn eine ausreichend hohe Rückführung der heißen Verbrennungsprodukte vorgesehen ist [3]. Die FLOX®-Technologie bietet somit eine stabile Verbrennung mit einer drastischen Reduktion der NO_x-Emissionen und einer Erhöhung des Wirkungsgrades ohne Vorwärmung der Reaktanden.

Aus technologisch-wissenschaftlicher Sicht gab es in der Vergangenheit nur einen dokumentierten Versuch, Kohlenstaub mittels Flammloser Oxidationstechnologie zu verbrennen. Neben den Forschungsarbeiten der Universität Aachen, in welchen die Flammlose Oxidation von Kohlenstaub unter Druck untersucht wurde (Fielenbach et al. [4]), hat die Universität Stuttgart die Flammlose Oxidation von Kohlenstaub innerhalb des FLOX-CO-



AL Projektes [5] in den Jahren 2005 bis 2008 erforscht. Außerdem wurden mehrere Untersuchungen zur Anwendung der HiTAC-Technologie zur Verbrennung von Kohlenstaub durchgeführt [6, 7, 8].

Hinsichtlich der Vielzahl von Kesseltypen für Kohlenstaubfeuerungen, deren Eignung abhängig ist vom Kohle-Typ und der thermischen Leistungsaufnahme, muss eine passende Auswahl getroffen werden. Neben speziellen Kesseln, zum Beispiel dem Schmelzkammerkessel für Kohlen mit hohem Aschegehalt oder Down-Shot-Feuerungsanlagen für schwach reaktive Kohlen, gibt es zwei allgemeine Setups, die sich durch die Position der Brenner unterscheiden. Die Brenner befinden sich entweder in den Wänden oder in den Ecken des Kessels. Letztgenannte Anordnung findet sich vor allem bei tangentialbefeuerten Kesseln wieder, die typischerweise mit Braunkohle befeuert werden. Bei einer Tangentialfeuerung bildet sich ein in der Brennkammermitte schwebender "Feuerball" aus. Die Brennerstrahlachsen sind tangential auf das Zentrum des Feuerballs gerichtet und stabilisieren seine Position und seinen Durchmesser. Die Kesselkonfiguration mit in den Wänden angeordneten Brennern ist meist als Boxer-Feuerung ausgeführt und kommt vor allem bei Steinkohlen zum Einsatz. Hierbei sind die Brennerstrahlachsen direkt auf die gegenüberliegende Wand oder auch den gegenüberliegenden Brenner ausgerichtet, so dass die Brenner in einer Ebene interagieren.

1.1 EU-Projekt FLOX-COAL

Das Potenzial der Flammlosen Oxidationstechnik für Kohlenstaub wurde innerhalb des durch die Europäische Union finanzierten FLOX-COAL Projektes untersucht. Das Projekt zielte darauf ab, die technische Machbarkeit eines Kohlenstaub-FLOX® Brenners nachzuweisen, wobei die NO_x-Emissionen auf vergleichbare typische Werte einer Wirbelschichtverbrennungsanlage reduziert werden sollten.

Im Rahmen dieses Projektes wurde zuerst ein Brenner im Labormaßstab entworfen und in einer 20 kW, Brennkammer getestet. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde das Brennerkonzept hochskaliert und in einem 80 kW_{th} Prüfstand getestet. Die Umsetzbarkeit dieser neuen Technologie für die Kohlenstaubverbrennung konnte somit gezeigt werden. Diese Arbeiten haben bestätigt, dass die Flammlose Oxidation ein großes Potenzial hat, um in der Kraftwerkstechnik erfolgreich Anwendung zu finden. Durch dieses Projekt konnten wertvolle Daten für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsprojekte gewonnen werden. So konnten z.B. im gestuften Verbrennungsmodus NO.-Emissionen von ca. 200 mg/m³ i.N. für verschiedene Kohlesorten erreicht werden. Diese Untersuchungen ergaben, dass die thermische NO, Emission um etwa die Hälfte, verglichen mit der konventionellen (gestuften Flammen-)Verbrennung, gesenkt werden konnte. Im ungestuften Verbrennungsmodus der flammlosen Oxidation konnten jedoch im Vergleich zur konventionellen Verbrennung ähnliche oder sogar höhere NO_-Emissionen gemessen werden. Beide Versuchsreihen (sowohl mit als auch ohne Luftstufung) haben einen leichten Anstieg der Brennstoff-NO, Konzentrationen für die Flammlose Oxidation gezeigt. Dieser kann auf die niedrigere Verbrennungstemperatur und einen unterschiedlichen Brennstoff/ Oxidant-Mischungsprozess zurückgeführt werden.

Im Rahmen des Projektes wurde festgestellt, dass das entwickelte Konzept des FLOX®-Brenners einen Nachteil bei ungestufter Verbrennung aufweist. Um dieses Defizit zu beheben und um das Problem zu lösen, muss der Zündverzug reduziert werden, was den Entgasungsprozess unterstützt. Dies kann durch eine Verbesserung des Mischungsvor-



gangs der Kohle und der heißen Rauchgase in Brennernähe realisiert werden [10]. Darüber hinaus zeigte die Forschungsarbeit von Pershing und Wendt [11], dass die Konversion des flüchtigen Brennstoffstickstoffs zu NO den Hauptbeitrag zur NO_x-Emission leistet und dass dieses im Gegensatz zu NO, welches aus dem Koks stammt, durch Veränderungen der Brenneraerodynamik kontrollierbar ist.

Dementsprechend wurde die Erforschung der Aerodynamik und speziell die Auswirkungen einer Änderung in Brennernähe als Ausgangspunkt des Projektes BWL 25DE vorgeschlagen.

Ebenfalls in FLOX-COAL [5] wurden numerische Simulationen eines tangential gefeuerten Steinkohlekessels durchgeführt. Diese haben gezeigt, dass niedrigste NOX-Emissionen durch eine Vergrößerung des Feuerballdurchmessers erreicht werden können bei gleichzeitig getrennten Einlassöffnungen für Kohle und Verbrennungsluft.

2 Projektziele

Ziel des Vorhabens ist es, einen neuen Kohlenstaub-Brenner basierend auf der FLOX®-Technologie zu entwickeln. Dabei sollen die Rahmenbedingungen für die FLOX®-Verbrennung von Kohlenstaub erforscht und entsprechende Brennerkonzepte untersucht werden. Dieser Teil der experimentellen Untersuchungen zielt darauf ab, die beste Brennerkonfiguration in Bezug auf Verbrennungseffizienz und niedrige NO_x-Emissionen zu finden. Um die NO_x-Emissionen wesentlich zu verringern und gleichzeitig einen hohen Ausbrand zu gewährleisten, muss die Aerodynamik in der Brennernähe optimiert werden. Daher sollen einige Brennerdesigns mit verschiedenen Düsenanordnungen (Kohle/Primärluft und Sekundärluft) konzipiert und experimentell getestet werden. Die experimentellen Untersuchungen sollen in einer 20 kW_{th} Versuchsbrennkammer mit gestufter und ungestufter Luftzufuhr durchgeführt werden.

Weiterhin soll ein FLOX[®]-befeuertes Kraftwerk konzipiert und bewertet werden. Die Ergebnisse aus den experimentellen Untersuchungen mit FLOX[®]-Brenner werden mit den Ergebnissen aus Versuchen mit einem konventionellen Kohlebrenner verglichen und die Unterschiede bei der Umstellung auf FLOX[®]-Betrieb bewertet. Dabei soll untersucht werden, ob konventionelle Kraftwerke mit FLOX[®]-Brennern nachgerüstet werden können und ob sich das Kesseldesign und die Betriebsweise durch die Umstellung des Verbrennungsmodus verändern. Dazu soll der Einfluss einer Umstellung auf FLOX[®]-Befeuerung auf den Kraftwerksbetrieb bewertet und entsprechende Feuerungskonzepte unter Anwendung entwickelter Bewertungskriterien abgeleitet werden. Anschließend werden Modellrechnungen durchgeführt, um die Vorteile einer FLOX[®]-Befeuerung zu bewerten.

2.1 Umsetzung der Hinweise aus den bisherigen Begutachtungen

Die NO_x-Reduktionsmechanismen wurden durch weitere Experimente untersucht, wobei sowohl ein Flammen- und ein FLOX-Brenner eingesetzt wurden. Es wurden keine weiteren studentischen Mitarbeiter in das Projekt mit einbezogen. Die Veröffentlichung der Projektergebnisse konnte mit einem Vortrag auf dem 25. Deutschen Flammentag 2011 umgesetzt werden.



3 Vernetzung

3.1 Vernetzung innerhalb KW21

Das Teilprojekt BW W 25DE baut auf den in diesem Projekt erzielten Ergebnisse auf. Darin wurde die Geometrie und die wichtigsten Funktionen eines 300 kW_{th}-FLOX-Brenner entwickelt. Hierzu wurden CFD-Simulationen durchgeführt, um die Eigenschaften der Durchmischung von Brennstoff, Rauchgas und Verbrennungsluft zu erforschen. Die Modellierung wurde mittels der CFD-Software AIOLOS durchgeführt, die für dreidimensionale turbulente reaktive Strömungen am IFK entwickelt wurde [15] und basiert auf den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen in BWL 25DE. Der Brenner wurde für eine einstufige Verbrennung entwickelt und an einer Pilotanlage getestet.

3.2 Vernetzung außerhalb KW21

Die Projektergebnisse aus BWL 25DE und folgend BWW 25DE dienen als Basis für das Projekt "FLOX-COAL-II – Development of Scale-Up Methodologies and Simulation Tools for the Demonstration of PC-FLOX Burner Technology in Full-Scale Utility Boilers" im Rahmen des RFCS-Forschungsprogramms der EU.

4 Vorgehensweise und Methodik

4.1 Grundlegende experimentelle Untersuchungen der flammlosen Oxidation

Es wurden grundlegende Untersuchungen der flammlosen Oxidation von verschiedenen Kohlen an einem 20 kW_{th} elektrisch beheizten Verbrennungsreaktor am IFK durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war es, den Einfluss verschiedener Brennerparameter auf das Abbrand- und Emissionsverhalten bei der flammlosen Oxidation von Kohlenstaub zu untersuchen und daraus ableitend das Brennerdesign eines Kohle-FLOX[®]-Brenners zu optimieren. Davon ausgehend wurde die beste Brenner-Konfiguration ausgewählt und die NO_x-Reduktionsmechanismen bei der flammlosen Verbrennung von Kohlenstaub durch detaillierte Messungen der Gaskonzentrationen entlang der "Flamme" untersucht.

4.2 Konzept eines FLOX[®]-befeuerten Kraftwerks

Die Anwendung der flammenlosen Brenner in einem wandgefeuerten Kessel mit Boxer-Anordnung (Brenner liegen an gegenüberliegenden Wänden) wurde mittels der CFD-Software AIOLOS numerisch untersucht, um die Eigenschaften der Mischungsvorgänge von Brennstoff, Rauchgas und der Verbrennungsluft zu erforschen. Die Hauptziele der numerischen Untersuchung waren

 Möglichkeiten für die Lage der Kohle-FLOX[®]-Brenner in Boxer-gefeuerten Kessel herauszufinden, einschließlich einer Vorhersage, welche Lage die meisten Vorteile bietet.



 das Strömungsfeld und die Gaszusammensetzung (O₂, CO) zu bestimmen, ebenso wie die Verbrennungstemperaturen und das Verbrennungsverhalten eines Kohle-FLOX[®]-Brenner im Großkessel.

Typischerweise werden Boxergefeuerte Systeme für Steinkohlen verwendet. Der Einsatz von Hochgeschwindigkeit-Strahlbrennern, wie für die flammenlose Verbrennung notwendig, bereitet in dieser Anordnung einige Schwierigkeiten, obwohl das Potenzial hoch ist. Einerseits ist die Gefahr von Auswirkung auf die gegenüberliegenden Wände durch den Strahl in Boxer-gefeuerten Systemen sehr hoch. Andererseits kann ein großer Vorteil aus der Boxer-Anordnung entstehen, wenn die frischen Reaktanden aus einem Brenner mit dem Rauchgas aus dem gegenüberliegenden Brenner vermischt werden. Um das Modell so einfach wie möglich zu halten, wurde der Kessel innerhalb dieser Arbeit ohne Luftstufung simuliert.

Die verwendete Brenner-Design-Methodik wurde innerhalb des Projektes BW W 25DE beschrieben. Die gesamte Verbrennungsluft wird durch die Primärluft-(PL)und Sekundärluft- (SL)Düsen geführt. Der Kohlenstaub wird durch die PL-Düsen gefördert und tritt mit einer Geschwindigkeit von 25 m/s ein. Die restliche Verbrennungsluft wird über zwei SL-Düsen mit einer Geschwindigkeit von 100 m/s zugeführt. Die hohe SL-Geschwindigkeit bewirkt eine ausgeprägte Rezirkulationszone, wodurch heiße Rauchgase zum Brenneraustritt gezogen werden und zu einer Verdünnung des Brennstoff/Luft-Gemisch führen.

5 Projektergebnisse und Ausblick

5.1 Grundlegende experimentelle Untersuchungen der flammlosen Oxidation

Bei den Versuchen an der 20 kW_{th}-Versuchsanlage wurden die Brennerparameter (1) Brennerpositionierung in der Brennkammerdecke (mit und ohne Brennerstein), (2) Abstand der Brennstoff- und Verbrennungsluftdüsen, (3) Anzahl der Verbrennungsluftdüsen und (4) Verbrennungsluftgeschwindigkeit variiert.

Für die Versuche wurden drei FLOX[®]-Brenner-Prototypen gebaut sowie ein existierender Flammenbrenner als Referenz verwendet. Die Versuche wurden mit und ohne Luftstufung durchgeführt, um den Einfluss der flammlosen Oxidation bei den verschiedenen Betriebsmodi zu bewerten. Es wurden drei verschiedene Kohlen verwendet: (1) Lausitzer Braunkohle, (2) Budryk-Steinkohle, die bereits in FLOX-COAL eingesetzt worden waren und (3) El Cerrejon Steinkohle, die auch an der 500 kW_{th}-Verbrennungsanlage zum Einsatz kommt (BW W 25DE).

In Abbildung 1 sind die NO_x-Konzentrationen im Rauchgas und der Massenanteil des unverbrannten Kohlenstoffs in der Flugasche für die getesteten Brennerkonfigurationen dargestellt. Bei der Untersuchung der Brennerposition zeigte sich, dass sich ein ebener Abschluss des Brennerkopfes mit der Brennkammerdecke positiv auf den FLOX[®]-Betrieb auswirkt. Im Vergleich zu früheren Untersuchungen wurden hiermit die NO_x-Emissionen im FLOX[®]-Betrieb bei ungestufter Verbrennung um 40 % gesenkt.





Abbildung 1: Trade-off zwischen NO_x-Emission im Rauchgas und Kohlenstoff in der Asche (Verbrennung von El Cerrejon-Steinkohle; Luftstufung bei 1,8 m; λ_b =0,9; λ_t =1,15; T_w=1300 °C; $\mathcal{V}_{SL(FLOX-Brenner)}$ =100 m/s)

Bei der ungestuften Verbrennung von El Cerrejon-Kohle wurde der positive Effekt einer Erhöhung des Abstandes zwischen Verbrennungsluftdüsen und Kohledüse, einer Reduktion der Verbrennungsluftdüsenanzahl von drei auf zwei Düsen sowie einer Absenkung der Luftgeschwindigkeit von 100 m/s auf 75 m/s auf die NO_x-Emissionen identifiziert. Das optimierte FLOX®-Brenner-Design (ebene Brennerkopfposition, zwei Luftdüsen, großer Düsenabstand) erzielte eine Reduktion der NO_x-Emissionen bei der ungestuften Verbrennung von El Cerrejon-Kohle um über 50 %. Mit Hilfe der Ascheproben wurde der Kohlenstoffausbrand bewertet, der unter FLOX®-Bedingungen vergleichbar oder besser war als im Flammenbetrieb. Jedoch wurde bei reduzierter Verbrennungsluftgeschwindigkeit (75 m/s) ein schlechterer Ausbrand (etwa 5 Ma-% C in der Asche) als bei höherer Verbrennungsluftgeschwindigkeit (100 m/s) festgestellt.

In Fall einer Luftstufung bei der flammlosen Oxidation von El Cerrejon-Steinkohle wurde kein wesentlicher Einfluss des Abstands, der Anzahl der Verbrennungsluftdüsen sowie der Verbrennungsluftgeschwindigkeit auf die NO_x-Emissionen beobachtet. Im Flammenbetrieb wurden NO_x-Emissionen um 200 mg/m³ i.N. erreicht, unter FLOX[®]-Bedingungen wurden diese um weitere 30 % verringert.

Zur Bestimmung der NO_x-Reduktionsmechanismen bei der flammlosen Verbrennung von Kohlenstaub wurden bei Versuchen im Flammen- und flammlosen Betrieb NO-, CO- und O₂-Konzentrationen an vier Stellen in der Brennkammer und am Brennkammerende gemessen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2 dargestellt.



Abbildung 2: NO-, CO- und O₂-Konzentrationen (Verbrennung von El Cerrejon-Steinkohle; λ_1 =1,15; T_w=1300 °C; $\mathcal{V}_{SL (FLOX-Brenner)}$ =100 m/s)

Im Flammenbetrieb ist aufgrund der hohen Verfügbarkeit von O₂ die CO-Konzentration im Brennernahbereich sehr niedrig, die gemessene NO-Konzentration jedoch sehr hoch. Bei der flammlosen Verbrennung hingegen wurden in Brennernähe deutlich niedrigere O₂-Konzentrationen und höhere CO-Konzentrationen gemessen, was in um etwa 50% reduzierten NO-Konzentrationen resultierte. Neben den homogenen NO_x-Reduktionsreaktionen spielen auch heterogene NO_x-Reduktionsmechanismen eine Rolle, die laut mehreren Autoren [11, 12, 13] durch die erhöhte CO-Konzentrationen begünstigt auf der Kokspartikeloberfläche ablaufen. Zudem sinkt der Einfluss dieses Mechanismus mit steigender Temperatur und ist ab etwa 1400 °C irrelevant. Die mittlere Temperatur in der Brennern-ähe ist im FLOX[®]-Betrieb deutlich niedriger als im Flammenbetrieb, wodurch der o.g. heterogene Reduktionsmechanismus einen höheren Beitrag leistet.

Die Ergebnisse der Experimente bestätigen das Potenzial der Technik.

5.2 CFD-Modellierung und Untersuchungen

Die Modellierung eines 960 MW_{th}-Kessel wurde mit 40 MW_{th}-Kohle-FLOX[®]-Brennern und El Cerrejon Steinkohle durchgeführt. Der rechteckige Brennkammerquerschnitt (16,5 x 13,5 m²) wurde bis zum ersten Plattenüberhitzer auf 28 m betrachtet, wobei nur einer von vier vertikalen Abschnitten modelliert wurde Die erste Brennerebene liegt auf 10 m, die zweite auf 15 m, jede Ebene ist mit zwei sich gegenüberliegenden Kohle-FLOX[®]-Brennern in der Vorder- und Rückwand des Kessels ausgestattet.





Abbildung 3: Möglichkeiten der horizontalen und vertikalen Brenneranordnung

Es wurden drei vertikale und zwei horizontale Anordnungen der Brenner mittels CFD-Analyse untersucht. Die untersuchten Fälle sind in Abbildung 3 dargestellt, wobei die prinzipiell geeigneten Fälle mit einem Haken gekennzeichnet sind. Jedoch erwies sich nur die Anordnung Fall 3B, in der die unteren Brenner mit einem Eintrittswinkel von 22,5° nach oben auf die zweite Brennerebene gerichtet sind, für eine Boxerfeuerung als gut geeignet. Jeder Brenner stabilisiert durch die eigene Rezirkulation seine Pyrolysezone, wodurch eine starke Rückführung von heißen Gasen aus der zentral geformten gemeinsamen Verbrennungszone entsteht. Durch die Neigung der Brenner der ersten Ebene ist die Verbrennungszone in der zweiten Brennerebene positioniert. Außerdem lässt sich eine starke Rezirkulation vorhersagen im Bereich zwischen der zweiten Brennerebene und dem erstem Überhitzter. Diese Rezirkulationszone bildet sich von der Brennkammermitte in Richtung des Flammenurspungs aus. Die detaillierten CFD-Vorhersagen sind für den 960 MW_m-Kessel mit einer Anordnung der Kohle-FLOX^{®-Brennern} als "Fall 3B" in Abbildung 4 dargestellt.



Abbildung 4: O₂-, CO-, Koks-Konzentrationen, und Gastemperatur (Verbrennung von El Cerrejon-Steinkohle in einem 960 MW_{th} Boxer-gefeuerten FLOX Kessel; λ,=1,15; T_w=500 °C; v_{s1} (FLOX-Brenner)=100 m/s)



Die CFD-Vorhersagen zeigen, dass ein Ersatz von konventionellen Brennern durch Kohle-FLOX®-Brenner in einem 960 MW_{th}-Kessel machbar ist. Es wurde ein akzeptabler Kohlenstoffausbrand nachgewiesen und eine Minderung der NO_x-Emissionen durch eine bessere Durchmischung aufgrund starker Rezirkulation in die Brennernahbereiche und durch ein gleichmäßigeres Temperaturprofil ohne Hot Spots erreicht. Die FLOX®-typisch starke Durchmischung führt zudem zu niedrigen O₂- und hohen CO-Konzentrationen, was die NO_x-Reduktion begünstigt. Diese Beobachtungen stimmen mit früheren Modellierungsergebnissen und experimentellen Ergebnissen eines einzelnen Kohle-FLOX®-Brenner im halbtechnischen Maßstab innerhalb des Projektes BW W 25DE überein.

Um das Kohle-FLOX[®]-Brenner-Konzept in einem realistischen Maßstab für Kohlefeuerungen praxisnah zu demonstrieren und die Kohle-FLOX[®]-Brenner-Technologie in den kommerziellen Maßstab weiterzuentwickeln, müssen noch folgende Aufgabenstellungen gelöst werden:

- Überprüfung der Notwendigkeit einer Neuanordnung der Wärmetauscher in der Brennkammer und im Konvektivzug ob des veränderten Temperaturprofils
- Entwicklung von Simulationswerkzeugen zur Anwendung in bestehenden CFD-Modellen, um die Reduktions- und Bildungsmechanismen vom NO_x in der Kohle-FLOX[®]-Verbrennung abzubilden.
- Untersuchung der Auswirkungen beim Übergang von räumlich beschränkten Prüfstand zu räumlich relativ unbeschränkten Großkessel (Brennerskalierung).
- Verständnis des Korrosionsverhaltens in einer Kohle-FLOX[®]-Verbrennung und die Auswirkungen auf die Kessel-Komponenten.

6 Wesentliche terminliche und inhaltliche Abweichungen zum Projektantrag

Die Arbeiten wurden im Zeitplan fertiggestellt. Die dreimonatige Verspätung im Arbeitspaket 2 "Konzept eines FLOX[®]-befeuerten Kraftwerks" verursacht durch das Warten auf die Ergebnisse eines anderen Projekts (BW W 25DE) wurde bis zum Projektabschluss aufgeholt.

7 Publikationen und Patente

7.1 Im Rahmen des Projektes entstandene Publikationen

7.1.1 Begutachtete Publikationen

 D. Ristic, M. Zieba, G. Scheffknecht: Effect of near burner aerodynamics on NO_x reduction in Pulverised Coal Flameless Oxidation. Tagungsband: 25, Deutscher Flammentag, Karlsruhe, Deutschland, 14-15.09.2011 VDI-Berichte ISSN 0083-5560 ISBN 978-3-18-092119-8

7.1.2 Nicht begutachtete Publikationen

Es liegen keine nicht begutachteten Publikationen für dieses Teilprojekt vor.



7.2 Gemeinsame Publikationen zweier oder mehrerer KW21 Teilprojekte

Es gab keine gemeinsamen Publikationen mit weiteren KW21-Teilprojekten.

7.3 Weitere Publikationen

- [2] Kumar, S., Paul, P.J., Mukunda, H.S.: Investigations of the Scaling Criteria for a MILD Combustion Burner. Proc. Combust. Inst., Vol. 30, (2005) pp. 2613-2621.
- [3] Wünning, J.G.: Flameless Oxidation. In: Proceedings of the 6thHiTACG Symposium, Essen, Germany (2005).
- [4] Fielenbach, C.; Holfeld, Th.; von Petery, C.; Renz, U.; Wünning, J.: NO_x-Reduction in a Pressurized Pulverized Coal Flame by Flue Gas Recirculation. 20th International Pittsburgh Coal Conference, (2003).
- [5] Ristic, D.; Schuster, A.; Santamaria, J.; Plion, P.; Hesselmann, G.; Wünning, J.G.; Honoré, D.; Giannakopoulos, D.; Stadler, H.; Förster, M.; Swiatkowski, B.; Kinal, E.: Final Report RFC-PR-04016, Research Found for Coal and Steel, (2010).
- [6] van de Kamp, W.L.; Ikeda, I.; Smart, J.P.: The Combustion of Pulverised Coal using Simulated Turbine Exhaust Gas as Oxidant. IFRF Research Report, (1992).
- [7] Orsino, S.; Tamura, M.; Stabat, P.; Constantini, S.; Prado, O.; Weber, R.: Excess Enthalpy Combustion of Coal. IFRF Research Report, (2000).
- [8] Schaffel-Mancini, N.; Mancini, M.; Szlek, A.; Weber, R.: Novel Conceptual Design of a Supercritical Pulverized Coal Boiler Utilizing High Temperature Air Combustion (HTAC) Technology. Energy, (2010), Vol. 35, S. 2752-2760.
- [9] Fielenbach, C.: Geschwindigkeit und Größe von Partikeln bei der Druckverbrennung von Kohlestaub. Ph.D. thesis, RWTH Aachen (2005).
- [10] Suda, T.; Takafuji, M.; Hirata, T.; Yoshino, M.; Sato, J.: A Study of Combustion Behaviour of Pulverised Coal in High-Temperature Air. Proc. Combust. Inst., (2002), Vol. 29, pp. 503-509.
- [11] Pershing, D.; Wendt, J.: Relative Contributions of Volatile Nitrogen and Char Nitrogen to NO_x Emissions from Pulverised Coal Flames. Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., (1979), Vol. 18, No. 1, pp. 60-67.
- [12] Levy, J.M., Chan, L.K., Sarofim, A.F., Beér, J.M.: NO/Char Reactions at Pulverized Coal Flame Conditions. Symposium (International) on Combustion, Vol. 18, (1981), pp. 111-120.
- [13] Chan, L.K., Sarofim, A.F., Beér J.M.: Kinetics of the NO-Carbon Reaction at Fluidized Bed Combustor Conditions. Combustion and Flame, Vol. 52, (1983), pp. 37-45.
- [14] Molina, A., Eddings, E.G., Pershing, D.W., Sarofim, A.F.: Nitric Oxide Destruction during Coal and Char Oxidation under Pulverized-Coal Combustion Conditions. Combustion and Flame, Vol. 136, (2004), pp. 303-312.
- [15] Schnell, U.: Numerical Modelling of Solid Fuel Combustion Processes Using Advanced CFD-Based Simulation Tools. Progress in Computational Fluid Dynamics, (2001), Vol. 1, No. 4, pp. 208-218.



7.4 Im Rahmen des Projektes entstandene Patente

Im Rahmen dieses Teilprojektes sind keine Patente entstanden.

8 Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses

8.1 Studentische Mitarbeiter

Wie An, Krummrein Thomas, Schwab Georg, Latzel Matthias

8.2 Studien-, Semester- und Bachelorarbeiten

Im Berichtszeitraum wurden keine Studien-, Semester- und Bachelorarbeiten erstellt.

8.3 Diplom- und Masterarbeiten

Im Berichtszeitraum wurden keine Diplom- und Masterarbeiten erstellt.

8.4 Promotionen

- D. Ristic
- Feasibility and NO_x Reduction Potential of Flameless Oxidation in Pulverised Coal Combustion.

9 Forschungsprogramme des Bundes und der EU

9.1 Angaben, ob weitere Drittmittel zum Projektthema eingeworben wurden, insbesondere aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen des Bundes und der EU

Es wurden keine weiteren Drittmittel zum Projektthema während des Berichtzeitraums eingeworben.

9.2 Geplante Antragsstellung bzw. künftige Förderung aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen von Bund, EU etc. sowie allgemeinen Förderprogrammen (z.B. DFG)

EU: RFCS-Förderprogramm: FLOX-COAL-II – Development of Scale-Up Methodologies and Simulation Tools for the Demonstration of PC-FLOX Burner Technology in Full-Scale Utility Boilers



Arbeitskreis Kraftwerkssysteme und Dampferzeuger

Projekt: BW W 25DE

Erprobung eines FLOX-Brenners für Kohlenstaubverbrennung im halbtechnischen Maßstab

Projektleiter:	Prof. Dr. techn. Günter Scheffknecht Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) Universität Stuttgart
Mitarbeiter:	DiplIng. Dragisa Ristic
Finanzierung:	EnBW Kraftwerke AG

1 Ausgangssituation

Weltweit wird die Flammlose Oxidation (FLOX[®]) häufig mit der High Temperature Air Combustion (HiTAC) oder mit der Intensive Low Oxygen Dilution (MILD) Verbrennung gleichgesetzt. Sowohl die FLOX[®]- als auch die HiTAC- oder MILD-Technologie wurden für die Verbrennung gasförmiger Brennstoffe entwickelt und zeichnen sich durch sehr niedrige NO_x-Emissionen und erhebliche Energieeinsparungen aus. Das wesentliche Merkmal ist die Oxidation von Brennstoff in einer hochgradig verdünnten Atmosphäre. Die erreichte Verteilung von Brennstoff und Oxidant auf ein großes Volumen verhindert die Entstehung einer sichtbaren Flammenfront und bewirkt ein homogenes Temperaturprofil. Neuerdings ist die Anwendung dieser Verbrennungstechnologien auch für feste fossile Brennstoffe wie Kohlenstaub von Interesse.

Im HiTAC- als auch im MILD-Verbrennungskonzept wurde in den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts vorgewärmte Verbrennungsluft auf hohem Temperaturniveau vorausgesetzt. Doch bald stellte sich heraus, dass die Luftvorwärmung keine notwendige Bedingung ist. Kumar et al. [1] haben gezeigt, dass MILD Verbrennung ohne Luftvorwärmung erreicht werden kann, wenn eine ausreichend hohe Rückführung der heißen Verbrennungsprodukte vorgesehen ist [2]. Die FLOX®-Technologie bietet somit eine stabile Verbrennung mit einer drastischen Reduktion der NO_x-Emissionen und einer Erhöhung des Wirkungsgrades ohne Luftvorwärmung der Reaktanden.

Aus technologisch-wissenschaftlicher Sichtweise gab es bisher nur einen bedeutsamen Versuch, die Flammlose Oxidationstechnologie für die Verbrennung von Kohlenstaub anzuwenden. Außer Forschungsarbeiten der Universität Aachen, im Zuge derer die druckaufgeladene Flammlose Oxidation von Kohlenstaub von Fielenbach et al. [3] untersucht wurde, wurde nur noch an der Universität Stuttgart die Flammlose Oxidation von Kohlestaub innerhalb des FLOX-COAL [4] Projektes in den Jahren 2005 bis 2008 studiert. Außerdem wurden mehrere Untersuchungen zur Anwendung der HiTAC-Technologie zur Verbrennung von Kohlenstaub durchgeführt [5, 6, 7].



1.1 EU-Projekt FLOX-COAL

Das Potenzial der Flammlosen Oxidationstechnik für Kohlenstaub wurde innerhalb des durch die Europäische Union finanzierten FLOX-COAL Projektes untersucht. Das Projekt zielte darauf ab, die technische Machbarkeit eines Kohlenstaub-FLOX® Brenners nachzuweisen, wobei die NO_x-Emissionen auf vergleichbare Werte, die für Wirbelschichtverbrennungsanlagen typisch sind, reduziert werden sollten.

Im Rahmen dieses Projektes wurde zuerst ein Brenner im Labormaßstab entworfen und in einer 20 kW,,-Brennkammer getestet. Um die Umsetzbarkeit der neuen Technologie für die Kohlenstaubverbrennung zu demonstrieren, wurde basierend auf diesen Ergebnissen das Brennerkonzept hochskaliert und in einem 80 kW_{th} Prüfstand getestet. Die innerhalb des Projektes durchgeführten Arbeiten haben bestätigt dass die Flammlose Oxidation ein deutliches Potenzial hat, um in der Kraftwerkstechnik angewendet zu werden. Durch das Projekt wurden wertvolle Daten für nachfolgende Forschungs- und Entwicklungsprojekte gewonnen. Im gestuften Modus konnten NO, Emissionen von ca. 200 mg/m³ i.N. bei der Verbrennung von verschiedenen Kohlesorten erreicht werden. Diese Untersuchungen ergaben, dass die thermische NO_-Emission um etwa die Hälfte, verglichen mit der konventionellen (gestuften Flammen-)Verbrennung, gesenkt werden konnte. Bei Versuchen der ungestuften flammlosen Verbrennung wurden im Vergleich zur konventionellen Verbrennung ähnliche oder sogar höhere NO,-Emissionen gemessen. Beide Versuchsreihen (sowohl mit als auch ohne Luftstufung) haben einen leichten Anstieg der Brennstoff-NO.-Konzentrationen für die Flammlose Oxidation gezeigt, der auf die niedrigere Verbrennungstemperatur und einen unterschiedlichen Brennstoff/Oxidant Mischungsprozess zurückgeführt werden kann.

Im Rahmen des Projektes wurde festgestellt, dass das entwickelte Konzept des FLOX[®]-Brenners einen Nachteil unter ungestuften Bedingungen aufweist. Eine mögliche Lösung dieses Defizits ist, den Zündverzug zu reduzieren und den Entgasungsprozess zu verbessern, indem das Mischen der Kohle und der heißen Rauchgase in der Brennernähe verbessert wird [8]. Darüber hinaus zeigte die Forschungsarbeit von Pershing und Wendt [9], dass die Konversion des flüchtigen Brennstoffstickstoffs zu NO den Hauptbeitrag zur NO_x-Emission leistet, und dass dieses im Gegensatz zu NO, welches aus Koks stammt, durch Veränderungen der Brenneraerodynamik kontrollierbar ist. Deswegen wurde die Erforschung der Änderungseffekte der Aerodynamik in der Nähe der Brenner als Ausgangspunkt des Projektes BW W 25DE vorgeschlagen.

1.2 Projekt BW L 25DE

Seit 2009 wurden grundlegende Untersuchungen der flammlosen Oxidation von verschiedenen Kohlen an einem 20 kW_{th} elektrisch beheizten Verbrennungsreaktor am IFK durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war es, den Einfluss verschiedener Brennerparameter auf das Abbrand- und Emissionsverhalten bei der flammlosen Oxidation von Kohlenstaub zu untersuchen und daraus ableitend das Brennerdesign eines Kohle-FLOX®-Brenners zu optimieren.



2 Projektziele

Ziel des Vorhabens ist es, einen neuen Kohlenstaub-Brenner basierend auf der FLOX®-Technologie im halbtechnischen Maßstab zu erproben und weiterzuentwickeln. Dabei soll die Machbarkeit der Kohle-FLOX®-Verbrennung unter realen Bedingungen nachgewiesen und Vorteile des Brennerkonzeptes herausgearbeitet werden. Insbesondere soll im Rahmen des Projektes ermittelt werden, wie groß das NO_x-Reduktionpotenzial ist bei gleichzeitig gutem Ausbrand der Steinkohle. Mit Hilfe dieser experimentellen Ergebnisse wird das Brennerdesign weiter optimiert. Des Weiteren wird ein Design für einen Kohle-FLOX®-Brenner im Kraftwerksmaßstab von 40 MW_{th} entwickelt.

2.1 Umsetzung der Hinweise aus den bisherigen Begutachtungen

Zu diesem Teilprojekt gab es keine Zwischenbegutachtung.

3 Vernetzung

3.1 Vernetzung innerhalb KW21

Das in Projekt BW W 25DE entwickelte Brenner-Design wird innerhalb des Projekts BW L 25DE verwendet. Mit Hilfe von CFD-Simulationen wird ein FLOX®-befeuertes Kraftwerk konzeptioniert. Die Modellrechnungen werden durchgeführt, um die Vorteile einer FLOX®-Verbrennung im Großkessel zu bewerten. Daher werden im Rahmen des Projekts BW W 25DE unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus dem Projekt BW L 25DE Bewertungsrichtlinien entwickelt, mit deren Hilfe Veränderungen bei einer Feuerungsumstellung von Flammen- auf FLOX®-Brenner quantifiziert und anhand derer Schlussfolgerungen über den Einfluss auf den Kraftwerksbetrieb gezogen werden.

3.2 Vernetzung außerhalb KW21

Die Projektergebnisse aus BW W 25DE dienen als Basis für das Projekt "FLOX-COAL-II–Development of Scale-Up Methodologies and Simulation Tools for the Demonstration of PC-FLOX Burner Technology in Full-Scale Utility Boilers" im Rahmen des RFCS-Forschungsprogramms der EU.

4 Vorgehensweise und Methodik

Auf der Grundlage der bestehenden Skalierungsmethoden wurde eine neue Strategie für die Skalierung von Kohle-FLOX[®]-Brennern angewandt. Mit Hilfe der experimentellen Ergebnisse aus Versuchen an einem elektrisch beheizten 20 kW_{th} Verbrennungsreaktor und mit Unterstützung von CFD-Simulationen wurde ein Kohle-FLOX[®]-Brenner mit einer Leistung von 300 kW_{th} für die experimentellen Untersuchungen an der 500 kW_{th} Kohlestaubverbrennungsanlage entwickelt. Der Brenner wurde ausgelegt, gebaut und getestet. Weiterhin wurden basierend auf den bisherigen Kenntnissen und Erfahrungen Scale-Up-Regeln entwickelt. Experimentell ermittelte Ergebnisse wurden genutzt, um das Brennerdesign zu optimieren und bis zu einer Kraftwerksgröße von 40 MW_{th} weiter zu entwickeln.



4.1 Theorien und Methodik der Skalierung

Idealerweise sollte die Skalierung vom Labormaßstab auf den halbtechnischen Maßstab auf der vollständigen Ähnlichkeit der Aerodynamik im Brennernahbereich und der chemischen Prozesse basieren. Dies ist jedoch in der Praxis nicht möglich [10]. Die Erfordernis, eine dimensionslose Gruppe konstant zu halten, ist oft unvereinbar mit der Anforderung einer anderen dimensionslosen Gruppe. Daher wurde in der vorliegenden Arbeit der Kohle-FLOX[®]-Brenner in Übereinstimmung mit folgenden Anforderungen skaliert:

- · geometrische Ähnlichkeit und
- · Ähnlichkeit der Vermischung zwischen Primärluft-Kohle-Jet und Sekundärluft-Jets.

Aus diesem Grund wurde das Konstante-Geschwindigkeit-Kriterium als primäre aerodynamische Skalierung herangezogen.

4.2 Grundlegende numerische Untersuchungen

Eine numerische Modellierung (CFD) wurde durchgeführt, um die Eigenschaften der Mischvorgänge von Brennstoff, Rauchgas und der Verbrennungsluft zu erforschen. Das Hauptziel der numerischen Untersuchung war es, die interne Abgasrezirkulationsrate zu quantifizieren sowie die Gaszusammensetzung und das Verbrennungsverhalten eines flammlosen Kohlenstaubbrenners im halbtechnischen Maßstab zu bestimmen. Die Modellierung wurde mittels der CFD-Software AIOLOS durchgeführt, die für dreidimensionale turbulente reaktive Strömungen am IFK entwickelt wurde. Detaillierte Informationen über AIOLOS sind in der Literatur zu finden [11].

5 Projektergebnisse und Ausblick

5.1 300 kW_{th} Kohle-FLOX[®]-Brenner

5.1.1 Grundlegende numerische Untersuchungen

Innerhalb des Projektes BW L 25DE wurde das Verbrennungsmodell hinsichtlich O_2 , CO_2 und CO-Konzentrationen anhand experimenteller Daten validiert. Diese wurden mittels Kohle-FLOX®-Brenner im Labormaßstab ermittelt. Die Validierung der Simulationsergebnisse hat gezeigt, dass eine gute Übereinstimmung der Daten sicher gestellt ist und das interne Abgasrückführungsverhältnis mit einer akzeptablen Genauigkeit quantifiziert werden kann. Innerhalb des Projektes BW W 25DE wurde der Brenner im halbtechnischen Maßstab modelliert (300 kW_{th}). Abbildung 1 zeigt als Beispiel das Strömungsfeld (Axialgeschwindigkeit) des mit dem Konstante-Geschwindigkeit-Kriterium hochskalierten Kohle-FLOX®-Brenner. Das Ziel der Simulation war es, die Auswirkungen der Vermischung zwischen der Primärluft-Kohle, der Sekundärluft und den rückgeführten heißen Verbrennungsprodukte zu modellieren.

Das Ergebnis zeigt eine starke Rezirkulation des Rauchgases im Brennernahbereich zwischen den Sekundärluftdüsen (unterer Teil der Abbildung 1). Diese Asymmetrie ergibt sich durch den Lochkreisdurchmesser von D_{LK}=270 mm der beiden sekundären Luftstrahlen, wodurch die Entwicklung eines gemeinsamen Strahles unterdrückt wird. Die kinetische Energie des Sekundärluftstrahls wird in diesem Fall überwiegend in eine stärkere Rezirkulation der Abgase umgewandelt. Folglich hat die Modellierung gezeigt, dass die Brenner-



nahbereichsatmosphäre stärker durch die Abgase verdünnt ist und die Zündtemperatur des Brennstoff/Luft/Abgasgemisches schneller erreicht wird.



Anmerkung: Der obere Bereich der Abbildungen stellt die Geschwindigkeitsfelder in der Ebene der Sekundäluftdüsen und der untere Teil die Geschwindigkeitsfelder in der Ebene zwischen den Sekundärluftdüsen dar.

Abbildung 1: Strömungsfeld des Kohle-FLOX[®]-Brenners im halbtechnischen Maßstab (300 kW_{th}; D_{LK}=270 mm; λ_t =1,15; T_w=1300 °C; $\mathcal{V}_{SL (FLOX-Brenner)}$ =100 m/s)

5.1.2 Das Brenner Design



Abbildung 2: Flexibler Kohle-FLOX®-Brennerkopf im halbtechnischen Maßstab

Das Design des Kohle-FLOX[®]-Brenners im halbtechnischen Maßstab wurde teilweise von dem im Teilprojekt BW L 25DE getesteten Brenner im Labormaßstab abgeleitet. Im Gegensatz zu diesem Brenner hat der FLOX®-Brenner im halbtechnischen Maßstab ein flexibles Design, das die Variation verschiedener Brennerparameter ermöglicht. Damit kann ein optimales Brennerkonzept im halbtechnischen Maßstab gefunden werden. Der skalierte Brenner ist mit 12 Sekundärluftdüsen ausgerüstet, die auf drei Kreisen um die Kohle/Primärluftdüse herum angeordnet sind. Der kleinste Kreis hat einen Durchmesser von 140 mm, der mittlere einen Durchmesser von 200 mm und der größte einen Durchmesser von 270 mm.



Der vorgeschlagene Brennerkopf ist in Abbildung 2 dargestellt. Der Brennerkopf besteht aus der Zentralöffnung für die Brennstoffdüse und 12 Öffnungen für die Sekundärluftdüsen, welche durch spezielle Einsätze modifiziert oder blockiert werden können. Folglich kann die Anzahl und der Teilkreisdurchmesser der Sekundärluftdüsen sowie die Geschwindigkeit der Sekundärluft variiert werden. Dieses ermöglicht eine breite Variation der Brennergeometrie und der Prozessparameter. Zusätzlich können durch die verschiedenen Konfigurationen der Sekundärluftdüsen unterschiedliche Brennerkonzepte betrachtet werden.

5.2 Erprobung des 300 kW_{th} Kohle-FLOX[®]-Brenners

Grundlegende Untersuchungen der flammlosen Oxidation ohne Luftstufung von El Cerrejon Steinkohle und Lausitzer Braunkohle wurden an der 500 kW_{th} Kohlenstaubverbrennungsanlage des IFK durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war es, den Einfluss verschiedener Brennerparameter auf das Abbrand- und Emissionsverhalten des skalierten Kohle-FLOX®-Brenner zu untersuchen und daraus ableitend das Brennerdesign weiter zu optimieren. Verschiedene Brennerkonfigurationen wurden experimentell getestet, um die beste Konfiguration zur Reduktion von NO_x zu finden bei gleichzeitiger Gewährleistung einer stabilen und effizienten flammenlosen Oxidation. Um das NO_x-Reduktionspotenzial zu bestimmen, wurden die NO_x-Konzentrationen entlang der Brennkammerachse und am Brennkammerende gemessen. Die besten Ergebnisse wurden erzielt mit zwei Sekundärluftdüsen auf dem äußersten Kreis (D_{1x}=270 mm).

Brenner	Kohle	NO _x @ 6% O ₂ [mg/m ³ i.N]	CO @ 6% O ₂ [mg/m ³ i.N.]	C in Flugstaub [Massen-%]	Kohle Ausbrand [%]
Flamme	Lausitz	755	<50	1.4	99.8
FLOX®	Lausitz	500	67	0.91	99.8
Flamme	El Cerejon	1265	138	4.8	99.1
FLOX®	El Cerejon	530	187	13.9	97.8

Tabelle 1: Gemessene Emissionen am Brennkammerende (Kohle-FLOX®-Brenner mit zwei Sekundärluftdüsen und DLK=270 mm)

In Tabelle 1 sind die am Brennkammerende gemessenen Emissionen zusammen mit Referenzwerten eines existierenden Flammenbrenners dargestellt. Im Vergleich zu den Flammenbrennern konnten die NO_x-Emissionen mit Kohle-FLOX®-Brennern bei der Verbrennung der Lausitzer Braunkohle um 30 % und bei der El Cerrejon-Steinkohle um 60 % gesenkt werden. Durch die Analyse der Ascheproben aus den verschiedenen Versuchen konnte der Kohlenstoffausbrand bewertet werden. Bei der Lausitzer Braunkohle wurde mit dem Kohle-FLOX®-Brenner ein mit dem Flammenbetrieb vergleichbarer Kohlenstoffausbrand erreicht. Es ist aber anzumerken, dass bei den Versuchen mit der El Cerrejon-Steinkohle ein schlechterer Ausbrand festgestellt wurde. Hier erreichte der Wert des unverbrannten Kohlenstoffs in der Asche bis zu 14 %. Unter Berücksichtigung des niedrigeren Aschegehalts der El Cerrejon-Steinkohle wurde ein Gesamtkohleausbrand von 97,8 % ermittelt.





Abbildung 3: Gaszusammensetzung und Temperaturprofile entlang der Brennkammermitte (Kohle-FLOX[®]-Brenner mit zwei Sekundärluftdüsen und D_{LK}=270 mm; Steinkohle El Cerrejon; v_{st. (FLOX-Brenner}=100 m/s; λ_t=1,15)

Um die Unterschiede zwischen einem konventionellen und einem flammlosen Brenner zu zeigen und die gemessene NO_x-Minderung zu erklären, wurden detaillierte Messungen der Atmosphärenzusammensetzung und Temperaturen entlang der Brennkammermitte durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abbildung 3 dargestellt. Messungen der Gaszusammensetzung zeigen, dass im Fall der flammlosen Verbrennung die Atmosphäre der Verbrennungszone mit rezirkulierten Abgasen verdünnt ist. Dadurch zeigen sich höhere Konzentrationen von CO und niedrigere Konzentrationen von O₂ verglichen mit dem Referenzbrenner (Flammenbrenner). Die gemessenen Unterschiede in den Temperaturfeldern (Abbildung 3) zwischen Flammen- und Flammlosbetrieb sind offensichtlich. Der gemessene Temperaturgradient beim FLOX®-Brenner ist, wie erwartet, deutlich niedriger verglichen mit dem Flammenbrenner.





Abbildung 4: Gaszusammensetzung und Temperaturprofile entlang der Brennkammermitte (Kohle-FLOX[®]-Brenner mit zwei Sekundärluftdüsen und D_{LK}=270 mm; Steinkohle El Cerrejon; ν_{SL (FLOX-Brenner)}=100 m/s; λ_t=1,15)

Beim flammlosen Betrieb ist ein gleichmäßigeres Temperaturfeld ohne ausgeprägte Temperaturspitzen zu erkennen. Dadurch wird die Bildung von thermischem NO reduziert. Die gemessenen NO-Profile zeigen, dass der Hauptteil des NO in der Nähe des Brennerauslasses gebildet wird.



Neben den Messungen entlang der Brennkammermitte wurden auch radiale Profilmessungen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen wurden mittels der Computersoftware Origin[®] 7.5 interpoliert und sind in Abbildung 4 dargestellt. Aus den Temperaturprofilmessungen in der Brennkammer kann das unterschiedliche Temperaturfeld zwischen flamm- und flammlosem Betrieb abgeleitet werden. Beim flammlosen Betrieb ist ein gleichmäßiges Temperaturfeld ohne höhere Temperaturspitzen zu erkennen. Dadurch wird die Bildung des thermischen NO reduziert.

Basierend auf der bereits angesprochenen Erhöhung der CO-Konzentration in der Verbrennungszone aufgrund des rezirkulierten Abgases kann die Verringerung der NO_x-Konzentration durch zwei weitere NO_x-Reduktionsmechanismen erklärt werden. Neben dem homogenen (Gas-Gas) kann auch der heterogene (Gas-Feststoff) Reduktionsmechanismus einen wesentlichen Beitrag leisten. Die zahlreiche Studien [12, 13, 14] zeigen, dass das CO die NO_x-Reduktion auf der Kokspartikeloberfläche verbessern kann. Die Autoren haben berichtet, dass dieser Mechanismus bei höheren Temperaturen (oberhalb 1400 °C) nicht mehr abläuft. Da bei flammloser Verbrennung die mittlere Temperatur in der Brennernähe deutlich niedriger ist als bei Flammenverbrennung (siehe Abbildungen 3 und 4), kann dieser Mechanismus einen höheren Beitrag zu NO_x-Reduktion leisten.

Insgesamt lässt sich damit festhalten, dass die niedrigen NO_x-Konzentrationen bei flammloser Verbrennung von Kohle auf das homogene Temperaturfeld und die Entgasung der Kohle unter sauerstoffarmer Atmosphäre bei erhöhten CO-Konzentrationen zurückzuführen sind.

5.3 Das Kohle-FLOX[®]-Brenner Design in Kraftwerksgröße (40 MW_{th})

Auch hier wurde das Konstante–Geschwindigkeit-Kriterium zur Skalierung verwendet. Der Vorteil der Skalierung des Kohle-FLOX®-Brenners mit dieser Methode ist, dass die Geschwindigkeiten der Primär- und Sekundärluftzufuhr konstant bleiben. Damit kann der Kohle-FLOX®-Brenner auf die gewünschte Wärmeleistung durch die Vergrößerung der Primär- und Sekundärluftdüsendurchmesser und durch die Vergrößerung des Lochkreisdurchmessers der Sekundärluftdüsen bei gleichbleibenden Geschwindigkeiten skaliert werden. Auf der anderen Seite führt dies zu einer erhöhten Strahlmischzeit und verringerten Strahlmischung, weil die Luftzufuhr-Geschwindigkeiten konstant bleiben, ebenso wie die Anzahl der Düsen. Durch die Skalierung des Kohle-FLOX®-Brenners mit dem Konstante-Geschwindigkeit-Kriterium ist allerdings die frühe Vermischung zwischen Primärluft-Kohle und Sekundärluft reduziert.

Mittels der Ergebnisse der Experimente wurden die Hauptkriterien für das Design eines Kohle-FLOX[®]-Brenners im Kraftwerksmaßstab ermittelt. Diese wurden bei der Konzeptionierung des Brenners beachtet:

- Der rezirkulierte Strom der Abgase wird noch vor der Zündungszone mit Brennstoff und Luft gemischt.
- Um die Zündung der Reaktanden in der sauerstoffreichen Zone zu verhindern, sollten der Kohleeinlass und die Verbrennungsluftdüsen möglichst weit voneinander getrennt werden.
- Die kinetische Energie der Sekundärluftdüsen soll eine möglichst hohe Abgasrezirkulation bewirken.



Die ermittelten Designkriterien wurden als Basisrichtlinien für die Skalierung des Brenners und Konzeptionierung des gesamten Kessels betrachtet.

Der Kohle-FLOX[®]Brenner im halbtechnischen Maßstab mit zwei Sekundärluftdüsen auf einem Lochkreisdurchmesser von D_{LK}=270 mm wurde als Grundlage für die Brennergeometrie und die Betriebsparameter genommen. Daher ist die allgemeine Anordnung des 40 MW_{th} Kohle-FLOX[®]Brenners identisch mit den zuvor modellierten Brennern in Abbildung 2. Es gibt eine zentrale Kohlenstaub-Versorgungdüse mit primärer Luftzufuhr, die umgebenden zwei Düsen liefern die Sekundärluft als Hauptverbrennungsluft. Nach dem Konstante-Geschwindigkeit-Kriterium wird ein Lochkreisdurchmesser von D_{LK}=3200 mm für die Sekundärluftdüsen vorgeschlagen (siehe Abbildung 5). Die Sekundärluft wird mit einer Geschwindigkeit von 100 m/s der Brennkammer zugeführt, die Primärluft mit 25 m/s.



Abbildung 5: Kohle-FLOX®-Brenner in Kraftwerksgröße (40 MW_{th})

Gemäß der durchgeführten CFD-Modellierung und der experimentellen Erfahrungen bei früheren Arbeiten innerhalb des Projekts ist dieses Brenner-Konzept FLOX[®]-fähig. Dabei wird der Kohlenstoff in eine verdünnte, homogene Reaktionszone gefördert, wo die Zündung stattfindet. Aufgrund der hohen Verdünnung in der Reaktionszone wird der Sauerstoff-Partialdruck reduziert, was zu einer niedrigen Umwandlung von Brennstoffstickstoff zu NO_x führt. Außerdem stellt ein einfacher Aufbau des 40 MW_{th} Brenners sowohl in technischer als auch in ökonomischer Hinsicht einen bedeutenden Vorteil dar. Trotzdem ist es notwendig, einen Brenner in einem realistischen Maßstab (Kraftwerksgröße) zu testen, um sicherzustellen, dass das grundlegende Konzept für Kohlefeuerung funktioniert.

6 Wesentliche terminliche und inhaltliche Abweichungen zum Projektantrag

Alle Aufgaben im Teilprojekt BW W 25DE wurden im Zeitplan abgeschlossen.

7 Publikationen und Patente

7.1 Im Rahmen des Projektes entstandene Publikationen

Im Rahmen des Teilprojektes BW W 25DE sind keine eigenen Publikationen entstanden.



7.2 Gemeinsame Publikationen zweier oder mehrerer KW21 Teilprojekte

Im Rahmen des Teilprojektes BW W 25DE sind keine gemeinsamen Publikationen entstanden.

7.3 Weitere Publikationen

- [1] Kumar, S., Paul, P.J., Mukunda, H.S.: Investigations of the Scaling Criteria for a MILD Combustion Burner. Proc. Combust. Inst., Vol. 30, (2005) pp. 2613-2621.
- [2] Wünning, J.G.: Flameless Oxidation. In: Proceedings of the 6th HiTACG Symposium, Essen, Germany (2005).
- [3] Fielenbach, C.; Holfeld, Th.; von Petery, C.; Renz, U.; Wünning, J.: NO_x-Reduction in a Pressurized Pulverized Coal Flame by Flue Gas Recirculation.
 20th International Pittsburgh Coal Conference, (2003).
- [4] Ristic, D.; Schuster, A.; Santamaria, J.; Plion, P.; Hesselmann, G.; Wünning, J.G.; Honoré, D.; Giannakopoulos, D.; Stadler, H.; Förster, M.; Swiatkowski, B.; Kinal, E.: Final Report RFC-PR-04016, Research Found for Coal and Steel, (2010).
- [5] van de Kamp, W.L.; Ikeda, I.; Smart, J.P.:The Combustion of Pulverised Coal using Simulated Turbine Exhaust Gas as Oxidant. IFRF Research Report, (1992).
- [6] Orsino, S.; Tamura, M.; Stabat, P.; Constantini, S.; Prado, O.; Weber, R.: Excess Enthalpy Combustion of Coal. IFRF Research Report, (2000).
- [7] Schaffel-Mancini, N.; Mancini, M.; Szlek, A.; Weber, R.: Novel Conceptual Design of a Supercritical Pulverized Coal Boiler Utilizing High Temperature Air Combustion (HTAC) Technology. Energy, (2010), Vol. 35, S. 2752-2760.
- [8] Suda, T.; Takafuji, M.; Hirata, T.; Yoshino, M.; Sato, J.: A Study of Combustion Behaviour of Pulverised Coal in High-Temperature Air. Proc. Combust. Inst., (2002), Vol. 29, pp. 503-509.
- [9] Pershing, D.; Wendt, J.: Relative Contributions of Volatile Nitrogen and Char Nitrogen to NOx Emissions from Pulverised Coal Flames. Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., (1979), Vol. 18, No. 1, pp. 60-67.
- [10] Spalding, D.B., Hottel, H.C., Bragg, S.L., Lefebvre, A.H., Shepherd, D.G., Scurlock, A.C.: The Art of Partial Modeling. Symposium (International) on Combustion, (1963) Vol. 9, pp. 833-843.
- [11] Schnell, U.: Numerical Modelling of Solid Fuel Combustion Processes Using Advanced CFD-Based Simulation Tools. Progress in Computational Fluid Dynamics, (2001), Vol. 1, No. 4, pp. 208-218.
- [12] Levy, J.M.; Chan, L.K.; Sarofim, A.F.; Beér, J.M.: NO/Char Reactions at Pulverized Coal Flame Conditions. Symposium (International) on Combustion, (1981), Vol. 18, pp. 111-120.
- [13] Chan, L.K., Sarofim, A.F., Beér J.M.: Kinetics of the NO-Carbon Reaction at Fluidized Bed Combustor Conditions. Combustion and Flame, Vol. 52, (1983), pp. 37-45.



[14] Molina, A., Eddings, E.G., Pershing, D.W., Sarofim, A.F.: Nitric Oxide Destruction during Coal and Char Oxidation under Pulverized-Coal Combustion Conditions. Combustion and Flame, Vol. 136, (2004), pp. 303-312.

7.4 Im Rahmen des Projektes entstandene Patente

Im Rahmen des Teilprojektes BW W 25DE sind keine Patente entstanden.

8 Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses

8.1 Studentische Mitarbeiter

P. Eshaghi, S. Pfitzer, M. Latzel, X. Yu, D. Schweitzer, T. Prathap

8.2 Studien-, Semester- und Bachelorarbeiten

A. Schmidt Up-Scale eines Kohle-FLOX®-Brenners durch Einsatz existierender Skalierungsmethoden

8.3 Diplom- und Masterarbeiten

Im Berichtszeitraum wurden keine Diplom- oder Masterarbeiten angefertigt.

8.4 Promotionen

D. Ristic Feasibility and NO_x Reduction Potential of Flameless Oxidation in Pulverised Coal Combustion

9 Forschungsprogramme des Bundes und der EU

9.1 Angaben, ob weitere Drittmittel zum Projektthema eingeworben wurden, insbesondere aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen des Bundes und der EU

Es wurden keine weiteren Drittmittel zum Projektthema während des Berichtzeitraums eingeworben.

9.2 Geplante Antragsstellung bzw. künftige Förderung aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen von Bund, EU etc. sowie allgemeinen Förderprogrammen (z.B. DFG)

EU: RFCS-Förderprogramm: FLOX-COAL-II – Development of Scale-Up Methodologies and Simulation Tools for the Demonstration of PC-FLOX Burner Technology in Full-Scale Utility Boilers



Kraftwerkssysteme und Dampferzeuger

Projekt: BW L 26DE

Untersuchung der physikalisch-chemischen Vorgänge bei der Umwandlung von Kohlemineralien zur Reduktion von Verschlackungstendenzen an den Strahlungsheizflächen moderner Kraftwerke

Projektleiter:	Prof. Dr. techn. Günter Scheffknecht
	Prof. DrIng. Uwe Schnell
	DiplIng. Jörg Maier
	Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) Universität Stuttgart
Mitarbeiter:	DiplIng. Selahattin Babat
	DiplIng. Olaf Lemp
Finanzierung:	Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg

1 Ausgangssituation

Feuerungssysteme moderner Dampferzeuger werden heute für den Einsatz von festen Brennstoffen unterschiedlicher Qualität ausgelegt. Um die Wirtschaftlichkeit der fossil gefeuerten Kraftwerke, sowie die Schonung der Ressourcen und eine Verringerung der Emissionen zu erzielen, ist es besonders wichtig die Kohle mit hohem Wirkungsgrad in Strom umzuwandeln. Ferner ist eine hohe Verfügbarkeit von großer wirtschaftlicher Bedeutung [6]. Die bei der Kohleverbrennung erzeugten Beläge an Kesselrohren behindern den Wärmetransport, und können zudem zu nicht geplanten Stillstandszeiten durch Betriebsstörungen und Schädigungen an Anlagenteilen führen [7]. Verantwortlich für diese Ablagerungen sind die mineralischen Bestandteile der Kohle, die beim Verbrennungsprozess partiell auch zu schmelzflüssigen Phasen umgewandelt werden. Bei Ablagerungen an den Feuerraumwänden wird zwischen Verschmutzung und Verschlackung unterschieden. Verschmutzungen sind lockere poröse Beläge, während Verschlackung als aufgeschmolzener glasartiger Überzug definiert ist [8,9].



1.1 Auftreten von Verschlackung und Verschmutzung in Staubfeuerungen

Festbrennstoffe wie Stein- und Braunkohle enthalten Bestandteile, die bei der Verbrennung Asche bilden. Bei der Verfeuerung dieser Brennstoffe werden große Mengen an Flugstaubteilchen im Rauchgasstrom als feste Aschepartikel oder bei hohen Temperaturen auch schmelzflüssig und gasförmig mitgeführt. Diese sind die Ursache für die Beläge auf Heizflächen von Brennkammern und Nachschaltheizflächen. Die Beläge entstehen durch Kontakt von im Brennstoff enthaltenen Aschebestandteilen mit den Heizflächen. Liegt der Schmelzpunkt der Flugstaubteilchen tiefer als die Temperatur der Rauchgase, mit der diese in die Berührungsheizflächen eintreten, so können sie an den Rohrwandungen haften bleiben [10]. Die Struktur und die chemisch-mineralogische Zusammensetzung der Ansätze im Kessel sind, neben der Mineralstoffsubstanz des Brennstoffes, vor allem von der Position im Kraftwerkskessel und der damit verbundenen Atmosphäre und Temperatur und von den Strömungsverhältnissen abhängig [11,12]. Der Schmelzpunkt kann bei Steinkohleflugasche durch Luftmangel (reduzierende Bedingungen) bei der Verbrennung wesentlich gesenkt werden [10]. In Verbindung mit schmelzpunktsenkenden Komponenten in der Asche, z.B. hohen Gehalten an Eisen oder Alkalien aber auch Kalzium und Schwefel wird die Ansatzbildung in Dampferzeugern begünstigt. Die Verschmutzungsneigung des Brennstoffes steigt durch diese Komponenten erheblich [6].

1.2 Stand der Wissenschaft und Technik im Hinblick auf Verschlackung und Verschmutzung

Aufgrund der stark variierenden Kohlezusammensetzungen ist es schwierig und aufwändig, allgemeingültige Aussagen über die physikalisch-chemischen Vorgänge der Mineralumwandlung im Feuerraum zu treffen; auch ist der gesamte Prozess von der Feuerungsart, der Heizflächenanordnung und dem Verbrennungsablauf abhängig [5]. Das Verschmutzungsverhalten von Brennstoffen ist durch seine Ascheinhaltstoffe geprägt. Die Chemie der Asche beeinflusst das Erweichungsverhalten bei Temperatureinwirkung. Oftmals wird die Ascheoxidanalyse für die Beurteilung der Ansatzneigung von Brennstoffen herangezogen. Grundsätzlich bringen folgende Aschetypen ein erhöhtes Ansatzrisiko mit sich [6]:

- Eisenhaltige Aschen
- Calziumhaltige Aschen
- Alkalihaltige Aschen
- Tonhaltige Aschen

In den meisten Fällen werden zur Bestimmung der Verschlackungsneigung so genannte Kennzahlen herangezogen, wenn es um eine schnelle Einschätzung geht. Sie berücksichtigen die unterschiedlichen Bildungsformen der Einzelbestandteile nicht. Ausgehend von einer Kohlensorte werden Verschlackungskennzahlen korreliert, die spezifische Eigenschaften dieser einen Kohle berücksichtigen [8,13]. Beispielhaft seien das Basen-Säuren-Verhältnis oder die Verschlackungs- und Verschmutzungskennzahl erwähnt. Allerdings sind Aussagen über die Verschlackungsneigung von Kohlen anderer Herkunft mit entsprechend anderer Zusammensetzung meist nur schwer möglich.



1.3 Depositionsbildung

Die Flugasche im Rauchgas kann durch unterschiedliche Ablagerungsmechanismen an den Dampferzeugerheizflächen zur Ansatzbildung führen. Die Ansatzbildung kann durch direkten Partikelantransport und -aufprall, Thermophorese, Kondensation und chemische Reaktion erfolgen [11]. Je nach Feuerungssystem und verwendetem Brennstoff führt eine Vielzahl verschiedener chemisch-physikalischer Vorgänge im Kessel zu unterschiedlichen Ablagerungsszenarien. In Abhängigkeit der Randbedingungen (u.a. Rauchgasatmosphäre, Temperatur der Partikel und der Oberflächen) können sich nach [9] folgende Belagstypen bilden:

- Teiloxidierte FeS-FeO-Schmelzen sowie teiloxidierte Kalzium-Schwefelverbindungen in unterstöchiometrischen Verbrennungszonen
- Alkalireiche Grundbeläge im Feuerraum und Überhitzern
- Verschmelzungen von silikatischen Schlackegläsern
- Alkali bzw. Erdalkali und schwefelreiche Grundschichten auf Wärmeübertragern
- Ablagerungen von Alkalisulfaten und Alkalichloriden auf Membranwänden und den konvektiven Heizflächen

Auf den Heizflächen bildet sich zuerst eine Initialschicht, auf der sich im Anschluss stufenweise eine Deckschicht aufbaut. Die Initial- und die Deckschicht werden im Folgenden näher erläutert.

Initialschicht:

In der Literatur wird die Initialschicht häufig dadurch charakterisiert, dass sie aus Feinstpartikeln besteht, welche aus Kondensations- und Sublimationsvorgängen aus der Gasphase hervorgegangen sind. Aufgrund der Partikelgröße unter 1 µm kommen Transportmechanismen wie Kondensation, Thermophorese oder Diffusion zum Tragen. Die Zusammensetzung dieser Schichten wird in der Literatur als natrium-, kalium-, schwefel-, kalzium- und eisenreich mit feinverteilten Partikeln beschrieben [15-17]. Den Alkalien und dem Eisen wird für die Bildung dieser Schichten eine große Rolle zugeschrieben, da die Verbindungen und deren Eutektika, die diese Elemente beinhalten, niedrige Schmelzpunkte aufweisen. Diese begünstigen Brückenbildungen und Versinterungen in der Initialschicht und damit einhergehendes rasches Ansatzwachstum.

Deckschicht:

Nach Bildung einer dünnen, chemisch aktiven Initialschicht, welche auch die Haftung nicht geschmolzener Partikel begünstigt, baut sich stufenweise eine Deckschicht auf. Aufgrund der isolierenden Wirkung der gebildeten Deckschicht steigt die Temperatur innerhalb des Belags, wodurch der Anteil an schmelzflüssigen Phasen im Belag weiter zunimmt. Dies impliziert, dass weitere nicht als Schmelze vorliegende große Partikel wie z.B. Quarz haften bleiben und somit die Deckschicht weiter anwächst [16].

2 Projektziele

In Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Energiesysteme (LES) der TU München sollten grundlagenorientierte Forschungsarbeiten im Bereich der Verschlackungsbildung in mit Kohle gefeuerten Kraftwerken durchgeführt werden. Hierfür sollten die im Rahmen des



Projektes vorgesehenen Brennstoffe umfassenden Analysen unterzogen werden. Einige ausgewählte Brennstoffe sollten in den IFK-Versuchsanlagen im Hinblick auf Verschlackungsproblematik untersucht werden, um das Verständnis über die Depositionsbildungsvorgänge zu vertiefen. Flugstäube entlang des Rauchgasweges und Depositionen sollten für detaillierte Analysen beprobt werden. Der Schwerpunkt sollte hierbei auf grundlegenden Untersuchungen zum Ablauf von Reaktionen und Mechanismen, die zur Bildung von Ablagerungen führen, gelegt werden. Ein besonderes Augenmerk wurde auf die Depositionscharakteristik der Initialschichten (auch gekühlte Deposition genannt) und Deckschichten (auch ungekühlte Deposition genannt) gelegt. Die umfangreichen experimentellen Daten sollen in die Entwicklung eines verbesserten Depositionsmodells einfließen, welches für unterschiedliche Mineralsysteme für Braun- und Steinkohlen einsetzbar sein soll.

2.1 Umsetzung der Hinweise aus den bisherigen Begutachtungen

Alle Hinweise der Begutachter wurden umgesetzt. Die Ursachen für die Unterschiede der gekühlten und ungekühlten Depositionen sind weitgehend geklärt worden. Weiterhin wurden intensive Literaturrecherchen durchgeführt und die aktuelle Ausgangssituation zusammenfassend dargestellt. Die Anzahl der Veröffentlichungen wurde erhöht und weitere Veröffentlichungen sind für das Jahr 2013 geplant. Es werden auch Dissertationen aus dem Projekt hervorgehen.

3 Vernetzung

3.1 Vernetzung innerhalb KW21

Neben der regelmäßigen intensiven Zusammenarbeit mit dem Projektpartner TU München, Lehrstuhl für Energiesysteme, der das assoziierte Teilprojekt BY 4DE "Reduktion von Verschlackungstendenzen" bearbeitete, fand ein intensiver Wissensaustausch mit dem Teilprojekt BWL 27DE statt. U.a. wurde der optimierte Brenner der Versuchsanlage, der im Rahmen von BWL 27DE realisiert wurde, auch bei den Versuchen für BWL 26DE eingesetzt.

3.2 Vernetzungen außerhalb KW21

- Für die Untersuchung der Mineralphasen und die Analyse der Depositionen wurde intensiv mit der Universität Stuttgart, Institut für Mineralogie und Kristallchemie (Dr. Theye) zusammengearbeitet.
- Für die Untersuchung der Partikelgrößen und die Siebung von Kohle und Aschen wurde mit der Universität Stuttgart, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik (Frau Issaeva-Wolf Alexandra) kooperiert.
- Ein intensiver Austausch fand mit dem Verbundprojekt "Korrosion und Verschlackung in Hochtemperaturkraftwerken mit neuen Werkstoffen" statt, das im Rahmen der COORETEC-Initiative des BMWi gefördert wurde.



4 Vorgehensweise und Methodik

In Abbildung 1 wird das Vorgehen und die Methodik zur Erzielung einer Reduzierung der Verschlackungsproblematik durch detaillierte Untersuchung des Brennstoffs und durch Experimente an Versuchs- und Kraftwerksanlagen dargestellt.

Nach Untersuchung verschiedener Brennstoffe wurden mit einer Auswahl von Brennstoffen Messungen an den institutseigenen Versuchsanlagen durchgeführt. Messungen haben an der 500 kW_{th} Kohlenstaubverbrennungsanlage (KSVA) und an dem 20 kW_{th} Verbrennungsreaktor (BTS-VR) stattgefunden. In Abbildung 1 (rechts) ist das Prozessschema der KSVA mit den Probenahmestellen dargestellt. Zusätzlich zur detaillierten Brennstoffuntersuchung wurden entlang des Rauchgasweges Flugstäube entnommen, um das Abbrandverhalten, die chemische Zusammensetzung und die Partikelgrößenverteilung der Flugstäube sowie die Mineralumwandlungen in den Aschen zu bestimmen. Rauchgaskonzentrations- und Temperaturmessungen wurden entlang des Rauchgasweges in der Versuchsanlage durchgeführt. Weiter wurden Depositionen an unterschiedlichen Stellen an den Anlagen beprobt. Ein Schwerpunkt war die Untersuchung und die Beurteilung des Belagsaufbaus auf gekühlten und ungekühlten Depositionssonden.



Abbildung 1: Das Vorgehen im Projekt (links) und die durchgeführten Messungen an der Versuchsanlage mit den schematisch eingezeichneten Flugstaubprobenahmestellen (rechts)

5 Projektergebnisse und Ausblick

Für eine Übertragbarkeit der Versuchs- und Messergebnisse vom Technikumsmaßstab auf Großkraftwerke wurden für die Verbrennungsuntersuchungen an den Versuchsanlagen (KSVA und BTS-VR) die in einem Heizkraftwerk verfeuerten Kohlen verwendet. Im Projekt wurden insgesamt sechs Steinkohlen analysiert. Die vier Steinkohlen Pittsburgh#8, El Cerrejon, Peabody und Calentur wurden an den Versuchsanlagen am IFK untersucht. Drei der vier Steinkohlen wurden im Rahmen des Teilprojektes BW W 26DE auch in einem Heizkraftwerk untersucht.



5.1 Kurz-, Elementar- und Oxidanalyse sowie Heizwerte der untersuchten vier Steinkohlen

Die Standardanalysen (Kurz-, Elementar- und Oxidanalyse sowie Heizwert) der Steinkohlen (Calentur, Peabody, El Cerrejon und Pittsburgh#8) werden in Tabelle 1 zusammenfassend dargestellt. Die kolumbianische Kohle Calentur weist im Vergleich zu den anderen Kohlen einen relativ hohen Flüchtigengehalt von 42,28 %,waf auf. Im analysefeuchten Zustand zeigt die amerikanische Peabody-Kohle den höchsten Aschegehalt von ca. 17,15 % an. Für diese Kohle wurde auch der höchste Schwefelgehalt von 1,64 % im wasser- und aschefreien Zustand ermittelt.

		Calentur	Peabody	El Cerrejon	Pittsburgh#8
H ₂ O	%,an	0,31	0,50	1,63	2,31
Flüchtige	%,waf	42,28	37,14	37,63	37,56
Asche	%,an	11,00	17,15	11,79	12,34
Fixed C	%,waf	57,73	62,86	62,37	62,44
С	%,waf	77,35	81,80	82,21	85,58
$H_{fue}I$	%,waf	5,09	4,79	4,94	5,20
Ν	%,waf	1,51	1,57	2,04	1,65
S	%,waf	1,09	1,64	0,87	1,14
O _{diff}	%,waf	14,96	10,20	9,94	6,43
H _o	J/g,an	28940	28560	27204	29770
H	J/g,an	27960	27700	26283	28770
Al ₂ O ₃	%	14,63	20,28	27,30	22,58
CaO	%	2,09	2,17	5,74	0,99
Fe ₂ O ₃	%	15,55	11,14	5,25	4,23
K ₂ O	%	1,43	1,65	1,35	2,67
MgO	%	1,08	1,02	1,67	0,69
Na ₂ O	%	1,77	0,33	0,55	0,48
P ₂ O ₅	%	0,08	0,19	1,22	0,15
SiO ₂	%	60,67	59,34	52,01	65,73
SO3	%	1,87	2,66	3,51	0,81
TiO ₂	%	0,82	1,21	1,40	1,68

Tabelle 1:

Kurz-, Elementar- und Oxidanalyse sowie Heizwert der Steinkohlen



Die Zusammensetzung der 815°C-Laborasche der vier Steinkohlen unterscheidet sich deutlich im Eisen-, Magnesium-, Natrium-, Kalium-, Kalzium- sowie Schwefelgehalt. Im Vergleich zu den anderen Kohlen zeigt Pittsburgh#8 einen hohen Anteil an sauren (SiO₂, TiO₂, Al₂O₃) und einen geringeren Anteil an basischen Elementen (Fe₂O₃, CaO, MgO, K₂O, NaO), was zu einer geringen Verschlackungsneigung führen würde. Das Basen-Säuren-Verhältnis ist für die Pittsburgh#8-Kohle am geringsten und für die Calentur-Kohle am höchsten. Die Oxidanalyse der Laborasche zeigt für die Calentur-Kohle den höchsten Gehalt von 15,55 % an Fe₂O₃, und der kleinste Gehalt mit 4,23 % wird für die Pittsburgh#8 ermittelt. Der höchste Gehalt von 5,74 % an CaO wurde für die El Cerrejon Kohle bestimmt. Calentur und Peabody zeigen etwa den gleichen Anteil an CaO (2,1 % und 2,17 %).

5.2 Mineralphasenanalyse

Zur Bestimmung des quantitativen Anteils an Mineralien, Größe, Form und chemischer Zusammensetzung diskreter Mineralpartikel wurden CCSEM-Analysen (Computer Controlled Scanning Electron Microscope) für ausgewählte Kohlen durchgeführt. Die sehr aufwändigen und teuren CCSEM-Analysen erfolgten mit den Kohlen, die in den Versuchsanlagen und im Rahmen des Teilprojektes BW W 26DE in einem Heizkraftwerk gefahren worden sind. Die Summe des externen und des internen Anteils der jeweiligen Mineralien ergibt den Gesamtmineralanteil eines bestimmten Minerals in der untersuchten Kohle. In Tabelle 2 ist der Mineralanteil in den drei Kohlen dargestellt. Die Analyse zeigt, dass etwa 50 Ma-% der gefundenen Mineralien in der Steinkohle Pittsburgh#8 als interne Mineralien und der Rest als externe vorliegen. Der Anteil an internen Mineralien liegt bei Calentur und bei Peabody bei etwa 63 Ma-% bzw. 56 Ma-% und der Anteil an externen bei etwa 37 Ma-% bzw. 44 Ma-%. Für alle drei Kohlen wurde das Mineral Pyrit, welches eine bedeutende Rolle im Hinblick auf Verschlackung spielt, festgestellt. Der Anteil am Pyrit in der Kohle beträgt für Pittsburgh#8 etwa 3 Ma-%, bei Calentur 12 Ma-% und bei Peabody 4 Ma-%.

		Pittsburgh			Calentur			Peabody	
Mineral	internes	externes	Ma-%	internes	externes	Ma-%	internes	externes	Ma-%
Kaolinit	18,4	15,6	34,0	12,2	5,1	17,3	21,0	10,9	32,0
K Al-Silikat	9,8	12,5	22,2	5,8	4,6	10,4	11,6	10,4	21,9
Quarz	6,6	7,1	13,8	18,1	11,0	29,1	6,6	6,1	12,7
Pyrit	1,6	1,1	2,7	7,3	4,9	12,3	0,6	3,8	4,4
Fe AL-Silikat	0,3	0,6	0,9	3,0	1,2	4,2	1,3	0,2	1,5
Ca Al-Silikat	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,9	0,5	1,4
Montmorillonit	2,0	1,0	3,1	1,3	0,4	1,6	0,8	0,5	1,3
Si-reich	1,1	1,7	2,8	0,3	0,3	0,5	0,9	0,8	1,8
andere	9,9	10,5	20,4	15,3	9,2	24,5	11,8	11,3	23,1
Summe	49,8	50,2	100,0	63,2	36,7	99,9	55,5	44,4	100,0

Tabelle 2:

2: Anteil an externen und internen Mineralien sowie Gesamtmineralanteil in den drei Steinkohlen



5.3 Verbrennungsuntersuchungen in der Kohlenstaubverbrennungsanlage (KSVA) des IFK mit der US-Kohle Pittsburgh#8

Die Bildung der Depositionen für Peabody, Calentur und Pittsburgh#8 wurden sowohl in einem Heizkraftwerk als auch in den IFK-Versuchsanlagen untersucht. Die Depositionen aus dem Heizkraftwerk wurden im Rahmen des Teilprojektes BW W 26 DE erforscht. Im Folgenden werden die Ergebnisse des KSVA-Versuchs mit Pittsburgh#8 diskutiert und im weiteren Verlauf wird kurz Bezug zu den Ergebnissen aus dem Heizkraftwerk genommen.

5.3.1 Mineralumwandlungen bei der Verbrennung der Steinkohle Pittsburgh#8

Die Mineralien sowohl in der Rohkohle als auch in den Flugstäuben entlang des Rauchgasweges und in den Depositionen wurden untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tabelle 3 zusammenfassend dargestellt. In der linken Spalte sind die Mineralien dargestellt, die in der Kohle festgestellt wurden. In den rechten Spalten sind die Umwandlungsprodukte dieser Mineralien in den Depositionen (gekühlt und ungekühlt) und in den Flugaschen dargestellt. Quarz, Mullit, Hämatit und Sanidin wurden in allen Flugstäuben (Flugstaub am Brennkammerende, Flugstaub an der Stelle, an der die Deposition beprobt wurde, Elektrofilteraschen, Luftvorwärmer und Tuchfilter) festgestellt. Die Mineralien, die in den Flugstäuben festgestellt wurden, sind auch in den Depositionen zu sehen. In den Depositionen (gekühlt und ungekühlt), die am Brennkammerende beprobt wurden, wurde noch zusätzlich Anhydrit (CaSO₄) festgestellt, das auf dem bekannten Reaktionsweg beruht:

CaO + SO₂ + $\frac{1}{2}$ O₂ \rightarrow CaSO₄ (findet bei Temperaturen < 950°C statt).

Da an dieser Stelle Temperaturen von etwa 800°C herrschen, wird die Bildung von Anhydrit sehr begünstigt.

Mineralien in der Rohkohle	Umwandlungen	Mineralien in den Depositionen	Mineralien in den Flugaschen
Quarz (SiO ₂)	÷	Quarz (SiO ₂)	Quarz (SiO ₂)
Kaolinit (Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄)	<i>→</i>	Mullit (3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂)	Mullit (3Al ₂ O ₃ ·2SiO)
Pyrit (FeS ₂)	\rightarrow	Hämatit (Fe ₂ O ₃)	Hämatit (Fe ₂ O ₃)
Muscovit (KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(F,OH) ₂)	÷	Sanidin (KAISi ₃ O ₈)	Sanidin (KAISi ₃ O ₈)
Montmorillonit (Na,Ca) _{0,33} (Al,Mg) ₂ (Si ₄ O ₁₀) (OH) ₂ .nH ₂ O + SO ₂	÷	Anhydrit (CaSO ₄)	

Tabelle 3: Mineralumwandlungen bei der Verbrennung der Pittsburgh#8-Kohle


5.3.2 Partikelgrößenverteilung und Oxidanalyse der Flugstäube entlang des Rauchgasweges

In Abbildung 2 sind Partikelgrößenverteilung der Flugstäube im Elektro- und Tuchfilter sowie die Ascheoxidzusammensetzung von Flugstaubproben entlang des Rauchgasweges dargestellt. Eine mittlere Partikelgröße von 10,7 µm, 4,9 µm, 3,1 µm und 2,4 µm wurde für die Positionen E1, E2, E3 im Elektrofilter und im Tuchfilter ermittelt (Abbildung 2, links). In Abbildung 2 (rechts) ist die chemische Zusammensetzung der Flugstäube entlang des Rauchgasweges dargestellt. Das Niederschlagen der Alkalien auf Partikeln im E-Filter ist deutlich zu sehen. Höhere Kalium-, Kalzium-, Magnesium- und Schwefelgehalte sind in kleiner werdenden Partikeln zu erkennen, da kleine Partikel grundsätzlich höhere spezifische Oberflächen aufweisen.



Abbildung 2: Partikelgrößenverteilung der Flugstäube im E-Filter und Tuchfilter (links) und Ascheoxidzusammensetzung (rechts) von Flugstaubproben entlang des Rauchgasweges E11¹, E27², E1, E2 E3 und Tuchfilter bei der Verbrennung von Pittsburgh#8 in der KSVA

Die Zunahme des Schwefelgehaltes korreliert mit der Zunahme des Alkaligehaltes in den feiner werdenden Partikeln. Die Ergebnisse der Partikelgrößenverteilung und der Ascheoxidzusammensetzung korrelieren sehr gut mit den Ergebnissen, die mit derselben Kohle in einem Heizkraftwerk im Rahmen des Teilprojektes BW W 26DE ermittelt wurden.

5.3.3 Untersuchung der gekühlten und ungekühlten Depositionen aus der 500 kW_{th} Versuchsanlage (KSVA)

Abbildung 3 stellt den Vergleich der gekühlten und der ungekühlten Depositionen bei der Verbrennung der Pittsburgh#8 Kohle dar. Beide Depositionen wurden bei einer Rauchgastemperatur von 1050°C auf der gleichen Ebene (Ebene 11) in der Versuchsanlage beprobt. Für beide Depositionen sind jeweils das Rasterelektronenmikroskop Bild (REM-Bild) und die dazugehörigen Elementverteilungsbilder für Silizium, Aluminium und Eisen dargestellt. Die Anströmrichtung ist durch einen gestrichelten Pfeil angedeutet.

¹ E11 ist 2,16 m vom Brenner entfernt ² E27 ist 5,92 m vom Brenner entfernt





Abbildung 3: Gekühlte Deposition (obere Zeile) mit Auslagerungszeiten/Dampftemperaturen von 19h/760°C und ungekühlte Deposition (untere Zeile) mit Auslagerungszeiten/Sondentemperatur von 90min/1050°C bei einer Rauchgastemperatur von 1050°C

Mehrere Ausschnitte der gekühlten Deposition wurden analysiert und bei allen untersuchten Stellen wurden feine Partikel mit nahezu gleicher chemischer Zusammensetzung festgestellt. Nur wenige große Partikel (Partikel > 60 µm) sind auf der gekühlten Deposition zu sehen. Auffallend sind bei der gekühlten Deposition die sehr feinen Partikel im Gegensatz zur ungekühlten Deposition an der gleichen Stelle. Weiter ist zu sehen, dass die gekühlte Deposition kompakter aufgebaut ist. Die vorliegenden Elementverteilungsbilder zeigen eine homogene Verteilung an Silizium und Aluminium sowohl in der gekühlten als auch in der ungekühlten Deposition. In beiden Proben sind einige Partikel, die nahezu aus reinem Silizium sind, zu sehen. In den Depositionen zeigt das Elementverteilungsbild für Eisen kaum Unterschiede in der gekühlten und ungekühlten Deposition.

5.4 Zusätzliche Untersuchungen des Minerals Pyrit in der Versuchsanlage BTS-VR am IFK

Die Ablagerungen aus einem Heizkraftwerk mit der Pittsburgh#8-Kohle wurden im Rahmen des Teilprojektes BW W 26DE detailliert untersucht. Ein Hauptergebnis dieser Untersuchungen war die Anreicherung eisenreicher Partikel in der Initialschicht im Gegensatz zur Deckschicht und des Flugstaubes vor Eintritt in die Konvektionsheizflächen. Die Depositionen der Initialschicht waren inhomogen aufgebaut und zeigten zahlreiche sphärische, eisenreiche und große Partikel über 100 µm Größe. Die Deckschicht war im Gegensatz zur Initialschicht locker aufgebaut und konnte mit einem Pinsel entfernt werden. Einige Partikel in der Initialschicht konnten hingegen nur schwer oder gar nicht vom Grundwerkstoff entfernt werden. Für die detaillierten Ergebnisse der Initial- und Deckschicht der Steinkohlen aus dem Heizkraftwerk sei auf den Bericht zum Teilprojekt BW W 26DE verwiesen.

Der Kessel des Heizkraftwerks ist mit 12 Stufenmischbrennern, die auf drei Ebenen verteilt sind, ausgelegt. In jeder Ebene ist auf jeder Wand ein Brenner exzentrisch angeordnet, wodurch sich eine Rotationsströmung im Feuerraum ausbildet. Oberhalb der Brennerebene sind in der Ausbrandluftebene jeweils drei Ausbrandluftdüsen pro Wand



angeordnet [18]. Durch diese Anordnung ist im unteren Bereich des Kessels die Rauchgasatmosphäre sauerstoffarm (λ <1), während durch die Zugabe von Ausbrandluft im darüber liegenden Bereich eine sauerstoffreiche Atmosphäre (λ >1) generiert wird. Da die eisenreichen Initialschichten aus dem eisenreichen Mineral Pyrit hervorgegangen sind (siehe Bericht zum Teilprojekt BW W 26DE), wurde, um die Bildung dieser Schichten zu interpretieren, zusätzlich zu den Initial- und Deckschichtuntersuchungen aus dem Kraftwerk noch das Ablagerungsverhalten des Pyrits durch zielgerichtete Experimente unter verschiedenen Bedingungen (oxidierende und reduzierende Atmosphäre) in der Versuchsanlage BTS-VR näher erforscht. Für die Beschreibung der Versuchsanlage sei auf [19] verwiesen.

In Abbildung 4 ist das REM-Bild und das dazugehörige Elementverteilungsbild für Eisen der Ablagerungen der Pyritversuche unter oxidierender und reduzierender Atmosphäre dargestellt. Die Ergebnisse der Depositionen unter reduzierender Atmosphäre zeigen sehr kompakte und verschmolzene Partikel im Vergleich zu Depositionen, die unter oxidierender Atmosphäre beprobt wurden (siehe Abbildung 4, Fotos A und E). Die kompakten Depositionen unter reduzierender Atmosphäre konnten von der Sonde mittels eines Pinsels nicht getrennt werden, während die porösen Depositionen unter oxidierender Atmosphäre leicht getrennt werden konnten. Weiter wurde durch die Analyse der Mineralphasen für den Flugstaub, an der gleichen Stelle an der auch die Depositionen beprobt wurden, festgestellt, dass unter oxidierender Atmosphäre der Umwandlungspfad von Pyrit zu Hämatit nahezu vollständig erfolgt. Unter reduzierender Atmosphäre hingegen kann Pyrit nicht vollständig zu Hämatit umgewandelt werden und es kommt hauptsächlich zur Bildung von Magnetit und Wüstit. Diese Ergebnisse bestätigen die auch in Veröffentlichungen gefundene Tendenz, wonach die Verschmutzungs- und Verschlackungsneigung bedeutend durch reduzierende Bereiche im Kessel beeinflusst wird, welche große Auswirkungen auf die Mineralumwandlungsprozesse haben.







Basierend auf diesen Versuchen und unter Einbeziehung von Untersuchungsergebnissen anderer Forschergruppen [20,21,22] können die gefundenen eisenreichen Depositionen auf der gekühlten Sonde aus dem Heizkraftwerk wie folgt zusammenfassend erklärt werden: Unter oxidierender Atmosphäre kann sich ein externes oder ein internes Pyritpartikel in der Kohle vollständig über den Umwandlungspfad von Pyrit zu Pyrrhotin, Wüstit, Magnetit und Hämatit umwandeln. Die Schmelztemperatur des Hämatits (1565 °C) würde über der Rauchgastemperatur im Kessel liegen und daher eher nicht an den Heizflächen zum Haften kommen.

Unter reduzierenden Bedingungen wird der Pyrit über den Umwandlungspfad von Pyrit zu Pyrrhotin, Wüstit, Magnetit nicht vollständig zu Hämatit umgesetzt. Eine FeS-FeO Schmelzphase bleibt erhalten, welche noch zusätzliche Aschepartikel einbinden kann oder mit anderen Mineralien wie zum Beispiel Illit, Kaolinit und Quarz weiter reagiert und je nach Reaktionspartner eine weitere Schmelze mit bestimmter chemischer Zusammensetzung ergibt. Diese Schmelzphasen können dann unter bestimmten Temperaturbedingungen (Rauchgas-, Partikel- bzw. Oberflächentemperaturen), Strömungsgeschwindigkeiten und Strahlungshintergrund im Kessel an Heizflächen zum Haften kommen.

5.5 Ausblick

Durch die am IFK entwickelte Vorgehensweise und die Methodik zur Erzielung einer Reduzierung der Verschlackungsproblematik durch detaillierte Untersuchung von Brennstoff und Experimenten an Versuchs- und Großanlagen konnte ein Mehrwert erzielt werden. Die entwickelte Methodik zur Untersuchung der gekühlten und ungekühlten Depositionen, die partikelbezogene Mineralphasenanalyse der Kohlen sowie die Analyse der Mineralumwandlungen während des Verbrennungsprozesses tragen zur Verbesserung des Verständnisses der Depositionsbildungsmechanismen bei. Die experimentellen Erkenntnisse können in die Entwicklung verbesserter Mineralumwandlungs- und Depositionsmodelle einfließen und somit können Aussagen über die Verschlackungsproblematik vor dem Einsatz einer bestimmten Kohle getroffen werden.

Die entwickelte Methodik und das Vorgehen zur Analyse des Brennstoffs, der Flugstäube und der Depositionen könnten in weiterführenden Arbeiten standardisiert werden. Darüber hinaus könnten weitere Messtechniken zur Analyse der Depositionen durchdacht und entwickelt werden.

6 Wesentliche terminliche und inhaltliche Abweichungen zum Projektantrag

Das Projekt konnte im Wesentlichen wie im Zeitplan vorgesehen durchgeführt werden. Der im Antrag vorgeschlagene Lösungsweg konnte gegangen werden.



7 Publikationen und Patente

7.1 Im Rahmen des Projektes entstandene Publikationen

7.1.1 Begutachtete Publikationen

[1] Babat, S.; Maier, J.; Scheffknecht, G.; Stein-Brzozowka, G.; Miller, E.: Deposition Behavior of a Bituminous Coal in a Large Pulverized Fuel Power Plant. Heat Exchanger Fouling and Cleaning, Crete Island, Greece, 2011

7.1.2 Nicht-begutachtete Publikationen und eingereichte Publikationen

- [2] Babat, S.; Maier, J.; Scheffknecht, G.: Investigation of the Mineral Pyrite in Atmospheric Combustion Reactor (BTS) under Oxidizing and reducing Atmosphere, Konferenz "Impacts of Fuel Quality on Power Production and the Environment", Puchberg/Österreich, 2012
- [3] Babat, S.; Maier, J.; Scheffknecht, G.: Creelman, R.A.; Ward, C.R.: Deposition behavior of three bituminous coals in a large pilverized fuel power plant, The 38th International Technical Conference on Clean Coal & Fuel Systems, The Clearwater Clean Coal Conference, Clearwater, USA, (June 2013)
- [4] Babat, S.; Maier, J.; Scheffknecht, G.: Depositionsbildung und Charakterisierung der Ascheablagerung vor Eintritt in die Konvektionsheizflächen eines steinkohlegefeuerten Heizkraftwerks, 45. Kraftwerktechnisches Kolloquium 2013, Dresden, (10/2013)
- [5] Babat, S.; Maier, J.; Stracke, J.; Scheffknecht, G.: Untersuchung eisenreicher Beläge vor Eintritt in die Konvektionsheizflächen eines steinkohlegefeuerten Heizkraftwerks, 26. Deutscher Flammentag, Duisburg-Essen, (09/2013)

7.2 Gemeinsame Publikationen zweier oder mehrerer KW21 Teilprojekte

Es wurden keine gemeinsamen Publikationen mehrerer Teilprojekte veröffentlicht.

7.3 Weitere Publikationen

- [6] Brüggemann, H.: Einschätzung des Verschmutzungsverhalten von festen Brennstoffen und deren Auswirkung auf die Auslegung von Dampferzeugern. Verminderung der Belags- und Korrosionsbildung in Kraftwerken Brennstoffauswahl – Monitoring - Konstruktive Maßnahmen – Reinigungssysteme, Publico Publications, Essen, 2004 2-7
- [7] Neuroth, M.: Thermochemische Simulation und experimentelle Untersuchung zur Ansatzbildung in Kohledampferzeugern am Beispiel rheinischer Braunkohle. Abschlussbericht, RWE Power Forschung und Entwicklung, Kohlequalität/ Versuchsanlagen, 2007
- [8] Couch, G.: Understanding Slagging and Fouling During PF Combustion. IEA Coal Research, London SW15 6AA, UK, 1994



- [9] Benson, S. A.; Jones M. L.; Harb, J. N.: Ash formation and deposition. In Smoot, L.D. (Ed.) Fundamentals of coal combustion for clean an efficient use. Elsevier Science, 299-373, Amsterdam 1993
- [10] Pracht, P.: Babcock-Handbuch Kohle. Deutsche Babcock & Wilcox-Dampfkesselwerke AG, Oberhausen, Jahr unbek.
- [11] Schlüter, A.: Untersuchung zum Verschmutzungsverhalten rheinischer Braunkohlen in Kohlendampferzeugern. Schriften des Forschungszentrum Jülich, Reihe Energie & Umwelt/ Energy & Environment Band 7, Jülich, 2008, ISBN 978-3-89336-524-1
- [12] Schlechter, G., Untersuchungen zum Ansatzbildungsverhalten Rheinischer Braunkohlen in staubgefeuerten Verbrennungsanlagen - Dissertation - RWTH Universität, Aachen. 2003, RWTH Aachen.
- [13] Raask, E.: Mineral Impurities in Coal Combustion. Hemisphere Publishing Corporation, Washington, 1985
- [14] Heinzel, T.: Ascheseitige Probleme bei der Mitverbrennung von Biomasse in Kohlenstaubfeuerungen. Dissertation, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen IVD Universität Stuttgart, Shaker Verlag, 2003, ISBN 3-8322-2632-X
- [15] Thornock, D.E.; Borion, R.W.: Developing a Coal Quality Expert: Combustion and Fireside Performance Characterization Factors. Topical report on coals from public service of Oklahomas's northeaster station, 1992.
- [16] Bryers, R.W.: Factors Critically Affecting Fireside Deposits in Steam Generators. Impact of Minera Impurities in Solid Fuel Combustion, edited by Gupta et al. Kluwer Academic / Plenum Publishers, New York, pp. 105-131, 1999.
- [17] Zbogar A. et al.: Shedding of ash deposits. Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 35, pp. 31-55, 2009.
- [18] Sabel, T.: Betriebsoptimierung von Kohlekraftwerksfeuerungen durch Experiment und Simulation / Thomas Sabel. - Aachen : Shaker, 2004. Hochschulort: Stuttgart. - Stuttgart, Univ., Diss., 2004, ISBN 3-8322-3223-0
- [19] Dhungel, B.: Experimental investigations on combustion and emission behaviour during oxy-coal combustion, Dissertation, Universität Stuttgart, 2010
- [20] McLennan, A.R., Bryant, G.W., Stanmore, B.R., Wall, T.F.: Ash Formation Mechanisms during pf. Combustion. Energy & Fuels, Vol. 14, No.1, 2000.
- [21] Srinivasachar, S., Boni, A. A.: A kinetic model for pyrite transformations in a combustion environment. Fuel 1989, 68, 829.
- [22] McLennan, A. R.: Ash formation in reducing conditions. Ph.D. Thesis, University of Newcastle, Newcastle, Australia, 1998.

7.4 Im Rahmen des Projektes entstandene Patente

Patente sind im Rahmen dieses KW21-Teilprojektes nicht entstanden.



8 Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses

8.1 Studentische Mitarbeiter

N. Spence	Unterstützung bei Konstruktion und Fertigung von Sonden
U. Kwiatkowska	Unterstützung bei der Auswertung der Flugstaubproben
A. Fröhlich	Unterstützung bei den Messungen
H. Bhusal	Unterstützung bei den Messungen und beim Aufbau der Versuchseinrichtungen
T. Bah Ndasi	Unterstützung bei den Messungen und beim Aufbau der Versuchseinrichtungen
Andreas Ibrahim	Unterstützung bei den Messungen und beim Aufbau der Versuchseinrichtungen
Matthias Ruttkowski	Unterstützung bei den Messungen und beim Aufbau der Versuchseinrichtungen
Erkan Can	Unterstützung bei den Messungen und beim Aufbau der Versuchseinrichtungen

8.2 Studien-, Semester- und Bachelorarbeiten

H. Bhusal	Bewertung von Steinkohlen und deren Aschen im Hinblick auf Verschlackungsneigung (Semesterarbeit)
E. Karadag	Bestimmung der physikalisch-chemischen Eigenschaften von Aschefraktionen und Belägen (Studienarbeit)
Erkan Can	Untersuchung des Pyrits in der BTS unter oxidierender und reduzierender Atmosphäre (Studienarbeit)
Matthias Ruttkowski	Bestimmung des Verschlackungsverhaltens der Steinkohle (Peabody) in einem Kohlekraftwerk (Studienarbeit)

8.3 Diplom- und Masterarbeiten

H. Bhusal	Verschlackungs- und Verschmutzungsuntersuchung von US- Steinkohle in Kohlestaubverbrennungsanlagen (Masterarbeit)
Erkan Can	Untersuchung der Steinkohle Pittsburgh#8 in der BTS im Hinblick auf Verschlackungsneigung (Diplomarbeit)
Andreas Ibrahim	Bestimmung des Verschlackungsverhaltens der Steinkohle (Calentur) in einem Kohlekraftwerk (Diplomarbeit)



8.4 Promotionen

Akbar, S.:	Numerical Simulation of Deposit Formation in Coal-Fired Utility Boilers with Biomass Co-Combustion. Dissertation, Universität Stuttgart, 2011
Lemp, O.:	Modellgestützte Vorhersage von Verschmutzungen und Verschlackungen in kohlestaubgefeuerten Kraftwerke, Dissertation Universität Stuttgart (in Vorbereitung)
Babat S.:	Methodik zur Beschreibung und Erfassung von Verschlackungs- und Verschmutzungsphänomen in Hochtemperaturkraftwerken, Dissertation, Universität Stuttgart (in Vorbereitung)

9 Forschungsprogramme des Bundes und der EU

9.1 Angaben, ob weitere Drittmittel zum Projektthema eingeworben wurden, insbesondere aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen des Bundes und der EU

COORETEC:	Verbundprojekt "Korrosion und Verschlackung in Hochtemperatur- kraftwerken mit neuen Werkstoffen"				
	"CLOCK" Chemical Looping Combustion von Kohle zur CO ₂ - Abscheidung in atmosphärischen Wirbelschichtreaktoren für einen Dampfkraftprozess				
	"ADECOS-ZWSF" Weiterentwicklung und Untersuchung des Oxyfuel-Prozesses mit Zirkulierender Wirbelschichtfeuerung auf Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit				
EU:	Beteiligung an diversen Projekten des 6. und 7. Rahmen- programms sowie des RFCS-Förderprogramms teilweise als Koordinator, u.a. an folgenden Projekten:				
	"CaOLing" (Development of post-combustion CO_2 capture with CaO in a large testing facility)				
	"CAL-MOD" (Modeling and experimental validation of Calcium Looping CO_2 -capture process for near-zero CO_2 emission power plants)				
	"C3-Capture" (Calcium Cycle for Efficient and low Cost CO ₂ Capture Using Fluidized Bed Systems)				
	"FLOX-COAL" (Development of a Pilot-Scale Flameless Oxidation Burner for Ultra Low NO_x Combustion of Pulverized Coal)				
	"OxyBurner" (Development of Advanced Large Scale Low NO _x Oxy-Fuel Burner for PF Combustion)				



"OxyMod" (Development and Experimental validation of a Mathematical Modelling Methodology for Oxy-Fuel Combustion for CO₂ Capture)

"ENCAP" (Enhanced Capture of CO₂)

"OxyCorr" (Boiler Corrosion under Oxy-fuel Conditions)

"DEBCO" (Demonstration of Large Scale Biomass Co-Firing and Supply Chain Integration)

"RECOMBIO" (Recovered Fuels combined with Biomass)

"DENOPT" (Optimisation of SCR-DeNO_x Catalyst Performance related to Deactivation and Mercury Oxidation)

"RECOFUEL" (Solid Recovered Fuels)

9.2 Geplante Antragsstellung bzw. künftige Förderung aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen

Basierend auf den im Projekt gewonnenen Erkenntnissen soll ein Forschungsantrag im Rahmen der COORETEC-Initiative des BMWi gestellt werden. Für die Fortsetzung der Untersuchungen zur Verschlackungs- und Verschmutzungsproblematik haben bereits mehrere Partner ihr Interesse an der Fortführung der Zusammenarbeit bekundet.

Arbeitskreis Kraftwerkssysteme und Dampferzeuger

Projekt: BW W 26DE

Reduktion von Verschlackungstendenzen in Abhängigkeit von Betriebsparametern und Brennstoff an den Strahlungsheizflächen moderner Kraftwerke

Projektleiter:	Prof. Dr. techn. Günter Scheffknecht			
	Prof. DrIng. Uwe Schnell			
	DiplIng. Jörg Maier			
	Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik Universität Stuttgart			
Mitarbeiter:	DiplIng. Selahattin Babat DiplIng. Olaf Lemp			
Finanzierung:	EnBW Kraftwerke AG			

1 Ausgangssituation

Verschlackungen und Verschmutzungen können den Betrieb kohlestaubgefeuerter Kraftwerke empfindlich stören. Sie verursachen zum Teil erhebliche Abweichungen von Betriebswerten, die Lasteinschränkungen, Wirkungsgradeinbußen und ungeplante Stillstände nach sich ziehen können. Zusätzlich verursachen sie Schäden an den Bauteilen.

Deshalb ist es ein Bestreben der Kraftwerksbetreiber, die eingesetzten Brennstoffe im Hinblick auf ihre Ansatzbildung in ihren Kraftwerken zu beurteilen. Hierzu werden empirische Kennzahlen (stoffliche Verhältniszahlen) zur Abschätzung der Verschlackungs- und Verschmutzungsneigung hinzugezogen [9]. Allerdings wurden diese kohlespezifisch entwickelt und berücksichtigen nicht die realen Geometrien, die Verbrennungsbedingungen oder die spezifischen Umwandlungsmechanismen, so dass eine Übertragung auf verschiedene Brennstoff- und Feuerungssysteme schwierig ist.

1.2 Depositionsbildung

Abbildung 1 stellt ein vereinfachtes Schema der Mechanismen dar, die für die Verschmutzung und Verschlackung ursächlich sind. Die verantwortlichen Brennstoffkomponenten sind anorganische Substanzen (Minerale), die entweder in der Brennstoffmatrix organisch gebunden oder in ihr eingeschlossen (*inkludiert*) sind oder als Fremdasche (*exkludiert*)

Reduktion von Verschlackungstendenzen an den Strahlungsheizflächen moderner Kraftwerke



vorliegen. Für die Verschmutzung und Verschlackung sind zwei Prozesse relevant: Zum einen die Kondensation bzw. Sublimation gasförmiger Komponenten (Alkalimetall-, Schwefel- und Chlorverbindungen) bei entsprechender Übersättigung in Wand- bzw. Rohrnähe, die während der Pyrolyse und dem Koksausbrand in die Gasphase übertreten, und zum anderen der Aufprall und das Haften von Flugaschepartikeln, die entweder während des Abbrands des Partikels aus der Brennstoffmatrix heraus freigesetzt werden oder als Fremdasche vorliegen.

In den meisten Fällen tritt der erstgenannte Fall (Kondensation) in Kombination mit dem Haften kleiner Partikel zuerst auf und sorgt für den Aufbau einer niedrigviskosen Schmelzschicht (Initialschicht), die auch feste größere Partikel auffangen kann und so zu einem verstärkten Aufbau der Depositionsschicht beiträgt (Deckschicht).



Abbildung 1: Schematische Darstellung der physikalisch-chemischen Vorgänge

Je nach Feuerungssystem und verwendetem Brennstoff führt eine Vielzahl verschiedener chemisch-physikalischer Vorgänge im Kessel zu unterschiedlichen Ablagerungsszenarien. In Abhängigkeit der Randbedingungen (u.a. Rauchgasatmosphäre, Temperatur der Partikel und der Oberflächen) können sich nach [10] folgende Belagstypen bilden:

- Teiloxidierte FeS-FeO-Schmelzen sowie teiloxidierte Kalziumschwefelverbindungen in unterstöchiometrischen Verbrennungszonen
- Alkalireiche Grundbeläge im Feuerraum und in den Überhitzern
- · Verschmelzungen von silikatischen Schlackegläsern
- · Alkali bzw. Erdalkali und schwefelreiche Grundschichten auf Wärmeübertragern
- Ablagerungen von Alkalisulfaten und Alkalichloriden auf Membranwänden und den konvektiven Heizflächen

Initialschicht: In der Literatur wird die Initialschicht häufig dadurch charakterisiert, dass sie aus Feinstpartikeln besteht, welche aus Kondensations- und Sublimationsvorgängen aus der Gasphase hervorgegangen sind. Aufgrund der Partikelgröße unter 1 µm kommen Transportmechanismen wie Kondensation, Thermophorese oder Diffusion zum Tragen. Die Zusammensetzung dieser Schichten wird in der Literatur als natrium-, kalium-, schwefel-, kalzium- und eisenreich mit feinverteilten Partikeln beschrieben [11-13]. Den Alkalien



und dem Eisen wird für die Bildung dieser Schichten eine große Rolle zugeschrieben, da die Verbindungen und deren Eutektika, die diese Elemente beinhalten, niedrige Schmelzpunkte aufweisen. Diese begünstigen Brückenbildungen und Versinterungen in der Initialschicht und damit einhergehendes rasches Ansatzwachstum.

Deckschicht: Nach Bildung einer dünnen, chemisch aktiven Initialschicht, welche auch die Haftung nicht geschmolzener Partikel begünstigt, baut sich stufenweise eine Deckschicht auf. Aufgrund der isolierenden Wirkung der gebildeten Deckschicht steigt die Temperatur innerhalb des Belags, wodurch der Anteil an schmelzflüssigen Phasen im Belag weiter zunimmt. Dies impliziert, dass weitere nicht als Schmelze vorliegende große Partikel wie z.B. Quarz haften bleiben und somit die Deckschicht weiter anwächst [12].

1.2 Rolle der eisenhaltigen Minerale bei der Bildung von Depositionen

Eisenhaltigen Mineralien wird bei der Ansatzbildung an Heizflächen eine wichtige Rolle zugeschrieben. Die Depositionsbildung wird durch die Aktivität der mineralischen Phasen beeinflusst. Ein Beispiel ist die Reaktion des Eisenoxids mit Aluminiumsilikat zu Eisen-Aluminium-Silikat. Das Eisen ist in Kohlen hauptsächlich in Form von Pyrit, Siderit, Chlorit, Goethit und Hämatit vorzufinden [14].

1.3 Umwandlungspfade der aktiven eisenhaltigen Mineralien Pyrit und Siderit

Die Ascheumwandlung der Mineralien Pyrit und Siderit und der Einfluss der reduzierenden und oxidierenden Atmosphäre auf die Umwandlung wurde bereits in vorangegangenen Studien diskutiert [15-17].

Wie in Abbildung 2 (oben) schematisch dargestellt zersetzt sich Pyrit (FeS₂) zu Pyrrhotin (Fe_{1,x}S) bereits bei Temperaturen zwischen 527-627°C. Das Pyrrhotin fragmentiert und oxidiert weiter zum Wüstit. Eine FeO/FeS Schmelzphase bildet sich bei etwa 1080°C. Diese Umwandlung ist von der Temperatur und der Sauerstoffkonzentration abhängig. Unter oxidierenden Bedingungen reagiert die Schmelzphase weiter zu Magnetit und Hämatit. Unter reduzierender Atmosphäre bleibt es als FeO-FeS Schmelzphase erhalten.

Wie in Abbildung 2 (unten) zu sehen gilt dieser Umwandlungspfad auch für den internen Pyrit, wenn er keinen Kontakt zu Aluminiumsilikaten hat. Jedoch verzögert sich die Oxidation bis das Kohlepartikel komplett umgesetzt (abgebrannt) ist. Solange das Kohlepartikel abbrennt, herrscht um das Mineral lokal reduzierende Atmosphäre. Wenn aber der interne Pyrit mit aluminosilikatischen Mineralien in Berührung kommt, so bildet der Aschepartikel zwei Phasen (FeS/Fe-Glas). Wenn Sauerstoff zur Verfügung steht oxidiert die FeS-Phase weiter und der Fe-Glasanteil wächst im Aschepartikel weiter.





Abbildung 2: Umwandlungsmechanismus für externen und für internen Pyrit nach McLennan et al. [15]

Externer Siderit zersetzt sich zu Wüstit, welcher seinen Schmelzpunkt bei 1370 °C hat. Dieser wandelt sich weiter – unter oxidierender Atmosphäre – in Magnetit um. Unter reduzierender Atmosphäre bleibt er als Wüstit erhalten (siehe Abbildung 3 oben). Der interne Siderit verhält sich wie der externe Siderit, wenn er keinen Kontakt zu Aluminosilikaten hat (siehe Abbildung 3 unten). Jedoch verzögert sich die Oxidation bis das Kohlepartikel komplett umgesetzt (abgebrannt) ist. Interner Siderit, der mit Aluminosilikaten in Berührung kommt, bildet direkt eisen-aluminosilikatische Glasaschen. Unter reduzierender Atmosphäre ist es ein zwei wertiges Eisen Fe²⁺ Glas und unter oxidierender Atmosphäre ist es ein dreiwertiges Eisen(Fe³⁺)-Glas. Das zweiwertige Eisen (Fe²⁺)-Glas bleibt unter reduzierender Atmosphäre beständig erhalten.



Reduktion von Verschlackungstendenzen an den Strahlungsheizflächen moderner Kraftwerke



Abbildung 3: Umwandlungsmechanismus für externen und für internen Siderit nach McLennan et al. [11]

1.4 Modellbildung der Verschlackung und Verschmutzung

Aufgrund der Leistungssteigerung des zur Verfügung stehenden Rechnerparks in den letzten Jahren werden zunehmend modellgestützte Vorhersagemethoden eingesetzt, die es ermöglichen Aussagen über die örtlich aufgelöste Verschmutzungs- und Verschlackungsneigung zu treffen [18-24,32-33]. Am IFK wurde ein Postprozessor für das hauseigene CFD-Simulationsprogramm AIOLOS entwickelt, welcher die relevanten Mechanismen der Verschmutzung und Verschlackung, die den Betrieb eines Kraftwerkskessels beeinflussen, in einem hohen Detaillierungsgrad miteinander verknüpft. Dieser Postprozessor verwendet als Randbedingung das berechnete Temperatur- und Geschwindigkeitsfeld sowie die Konzentrationen der Hauptrauchgasspezies (CO₂, O₂, H₂O, CO) zur Berechnung der Partikeltrajektorien, welche in einem mitbewegten Koordinatensystem in der Lagrange-Formulierung erfolgt. Dazu wird die Impulsbilanz an einem Partikel, welche die Widerstandskraft F_w und die Auftriebskraft F_A berücksichtigt, analytisch gelöst:

$$\frac{d(m_P \cdot u_P)}{dt} = \underbrace{\frac{c_W}{2}\rho_g A_P(u_P - u_G)|u_P - u_G|}_{F_W} + \underbrace{m_P g\left(1 - \frac{\rho_G}{\rho_P}\right)}_{F_A} \tag{1}$$

mit der Masse m_p und der Geschwindigkeit u_p des Partikels, dem Widerstandsbeiwert c_{w^n} der Gas- und Partikeldichte ρ_c bzw. ρ_p , der Querschnittsfläche A_p des Partikels und der Schwerebeschleunigung g. Die aufgrund der Gasphasenturbulenz resultierenden Fluktuationen werden mit einem Stochastic-Separated-Flow-Modell berücksichtigt

Die einzelnen berechneten Trajektorien repräsentieren einen Anteil der Gesamtmasse des Brennstoffmassenstroms. Um einen statistisch verlässlichen Wert zu erhalten, muss deshalb eine hohe Anzahl in der Größenordnung von einigen Hundertausend Trajektorien berechnet werden.

Ein wesentlicher Baustein des Postprozessors ist die Vorhersage der Haftrate. Eine Bilanzierung des Stoßverhaltens fester Körper wurde in [19] diskutiert. Aufgrund der hohen Anzahl der zu betrachtenden Partikel und dem dadurch bedingten hohen Aufwand und der unsicheren Anwendung der Ansätze wurden in der Vergangenheit zumeist semi-empirische Modellierungsansätze verwendet, die die "Klebrigkeit" eines Partikels vorhersagen. Ziel dieser Modelle ist die Vorhersage einer Wahrscheinlichkeit, mit der ein Partikel bei einem Stoß (Kontakt) an einer Oberfläche haften bleibt bzw. reflektiert wird. Diese Modelle gehen auf den Ansatz von Walsh [26] zurück:

$$f_{Haft} = \underbrace{W_P(T_P, X_P)}_{\substack{klebrige\\Partikel}} + \underbrace{[1 - W_P(T_P, X_P)] \cdot W_O(T_O, X_O)}_{klebrige \ Oberfläche}$$
(2)

 $f_{\rm Haft}$ berücksichtigt dabei die Haftwahrscheinlichkeit auftreffender Partikel W_p und die Haftwahrscheinlichkeit der Oberfläche W_o , jeweils in Abhängigkeit von ihrer Temperatur $T_{(0/P)}$ und Zusammensetzung $X_{(0/P)}$. Dieser Wert liegt dabei zwischen 0 (nicht haften) und 1 (vollständig haften).

Ausgehend von der Ascheoxidzusammensetzung wird die Viskosität des Partikels und der Oberfläche in Abhängigkeit von der Temperatur berechnet und zu einer Referenzviskosität – unterhalb derer das Partikel bzw. die Oberfläche als vollständig klebrig gilt – ins Verhältnis gesetzt und so eine Haftwahrscheinlichkeit bestimmt. Hierzu werden empirische Korrelationen basierend auf Viskositätsmessungen silikatischer Gläser eingesetzt. Eine Übertragung auf Brennstoffe mit niedrigen SiO₂-Gehalten ist somit nur unter Vorbehalt möglich. In der Literatur sind Werte zwischen 8 und 10⁵ Pas zu finden.

Aus diesem Grund wurde ein Modell entwickelt, welches in Abhängigkeit von verschiedenen, am IFK durchgeführten Brennstoffanalysen (RFA¹, XRD², CCSEM³) den Schmelzphasenzustand basierend auf einer thermodynamischen Gleichgewichtsbetrachtung berechnet und der Haftwahrscheinlichkeit gegenüberstellt. Dieser Ansatz geht auf Frandsen [23] zurück. Hierzu wird das kommerzielle Softwarepaket FactSAGE verwendet, welches bei der Bewertung des Ascheschmelzverhaltens und des Verschlackungs- und Verschmutzungspotentials von Braunkohlen bereits erfolgreich eingesetzt wurde. Ausgehend von den anorganischen Brennstoffkomponenten und einer Gasatmosphäre berechnet FactSAGE den Phasenbestand des Stoffsystems in Abhängigkeit von seiner Temperatur unter Zugrundelegung des thermodynamischen Gleichgewichts. Die Basis der Berechnungen sind Datensätze mit thermodynamischen Stoffdaten (meist Vermessung binärer oder ternärer Systeme), die auf das betrachtete Multikomponentensystem angewandt werden [24].

¹RFA = Röntgenfluoreszenzanalyse, ²XRD = X-Ray Diffraction, Röntgenbeugung,

³CCSEM = Computer Controlled Scanning Electron Microscopy

2 Projektziele

In Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Energiesysteme der TU München (LES) sollte ein profundes Verständnis der Umwandlungsprozesse der Minerale im Brennstoff ausgehend von zahlreichen Analysen herausgearbeitet werden. Geplant waren sowohl Experimente im Labor- und Technikumsmaßstab als auch Messungen in einem Kraftwerk. Eine Übertragbarkeit der Versuchs- und Messergebnisse vom Labor- und Technikumsmaßstab auf das Großkraftwerk sollte u.a. durch die Verwendung vergleichbarer Kohlequalitäten gewährleistet werden. Es sollten ebenfalls gezielt aktuell übliche Anlageneinstellungen der Kraftwerke bei den Versuchen im Technikumsmaßstab in den jeweiligen Versuchsanlagen eingestellt werden.

Desweiteren sollten am LES in Zusammenarbeit mit dem IFK mathematische Modelle erstellt werden, die die experimentellen Erkenntnisse beschreiben. Diese sollten ergänzend in den oben beschriebenen Postprozessor des CFD-Codes AIOLOS implementiert werden und bei der Simulation des untersuchten Kraftwerks angewendet werden. Den Schwerpunkt bildet dabei die Vorhersage der Haftrate und der Umwandlungsmechanismen der Flugasche.

2.1 Umsetzung der Hinweise aus den bisherigen Begutachtungen

Es mussten keine Anpassungen vorgenommen werden.

3 Vernetzung

3.1 Vernetzung innerhalb KW21

Neben der regelmäßigen intensiven Zusammenarbeit mit dem Projektpartner TU München, Lehrstuhl für Energiesysteme (LES), der das assoziierte Teilprojekt BY 4DE "Reduktion von Verschlackungstendenzen" bearbeitete, fand ein intensiver Wissensaustausch mit dem Teilprojekt BW W 27DE statt.

3.2 Vernetzung außerhalb KW21

Ein intensiver Austausch fand mit dem Verbundprojekt "Korrosion und Verschlackung in Hochtemperaturkraftwerken mit neuen Werkstoffen" statt, das im Rahmen der COORE-TEC-Initiative des BMWi gefördert wurde.

4 Vorgehensweise und Methodik

4.1 Methodik Modellbildung

Das Anliegen der Modellierung ist es reale Phänomene aus der Physik und der Chemie mit Hilfe von mathematischen Zusammenhängen zu beschreiben. Hierzu ist als erster Schritt die Identifizierung der entsprechenden Phänomene notwendig. Dies geschieht ausgehend von den gewonnenen Erkenntnissen aus den in diesem Projekt zahlreich durchgeführten Analysen des IFK. Unterstützend werden publizierte Erfahrungen anderer Forschergruppen hinzugezogen. Daran schließt sich die Erstellung von Algorithmen und



deren Einbindung in den Quellcode an, ehe eine Überprüfung der Plausibilität und der parametrischen Sensitivität der Modelle durch die Simulation von Testfällen erfolgt.

4.2 Methodik Simulation

Vor der Simulation eines Großkraftwerks sind zwei wesentliche Schritte notwendig; einerseits die Bilanzierung der verfahrenstechnischen Parameter und andererseits das Erstellen des CFD-Modells, welches die konstruktiven Randbedingungen des Kessels abbildet. Die Bilanzierung erfolgt auf der Basis der vom Industriepartner bereitgestellten Betriebsdaten. Mit Hilfe eines Excel-Files werden die Prozessparameter berechnet. Ausgehend von den gemessenen Massenströmen im Wasser-/Dampfkreislauf und den entsprechenden Temperaturen werden die Wärmeaufnahmen berechnet. Außerdem müssen die Temperatur und Menge der Primär-, Sekundär- und Ausbrandlüfte sowie der Brennstoffmassenstrom bestimmt werden. Die geometrischen Randbedingungen werden durch das erstellte CFD-Modell des Kessels festgelegt. Anhand der Konstruktionszeichnungen wird der Kessel in Kontrollvolumina diskretisiert und die Einlass- und Auslassflächen festgelegt. Dabei werden die Bündelheizflächen als sogenannte poröse Blöcke modelliert.

5 Projektergebnisse und Ausblick

5.1 Messkampagne

Im Rahmen des Projekts wurden zwei Messkampagnen im HKW 2 Altbach/Deizisau der EnBW durchgeführt; zum einen im Winter 2009 und zum anderen im Winter 2012. Während dieser beiden Messkampagnen wurden neben zahlreichen Rauchgasmessungen (Temperatur, Konzentrationen), Flugstaubentnahme und E-Filteraschen auch Depositionssonden vom IFK ausgelagert. Ein Schwerpunkt war die Untersuchung und die Beurteilung des Belagaufbaus auf gekühlten und ungekühlten Depositionssonden vor Eintritt in die Konvektionsheizflächen. Mit der gekühlten Sonde wurde die Initialschicht, die sich unmittelbar auf den Kesselrohren bildet, untersucht, während mit der ungekühlten Sonde Untersuchungen im Hinblick auf die Deckschicht durchgeführt wurden. Zu den Messkampagnen wurde ein ausführlicher Bericht verfasst. An dieser Stelle wird auf die Analyse und Bewertung der Depositionsproben eingegangen. Es wurden insgesamt die Deposition von drei Steinkohlen analysiert (Pittsburgh#8, Peabody und Calentur). Für die Standardanalysen (Kurz-, Elementar- und Oxidanalyse sowie Heizwert) sei auf den Bericht zum Teilprojekt BW L 26DE verwiesen.

Abbildung 4 stellt den Vergleich der gekühlten (erste drei Spalten) und der ungekühlten Depositionen (letzte drei Spalten) für die untersuchten Steinkohlen dar. Die oberste Zeile zeigt das BSE⁴-Bild und die anderen Zeilen zeigen die Elementverteilungsbilder für Silizium, Eisen, Kalzium und Schwefel. Das Elementverteilungsbild für Aluminium zeigt eine ähnliche Verteilung wie für Silizium und wird daher in Abbildung 4 aus Platzgründen nicht dargestellt.

⁴ Backscattered Electrons



gekühlte	Deposition (Initi	alschicht)	ungekühlte Deposition (Deckschicht)			
Pittsburgh	Calentur	Peabody	Pittsburgh	Calentur	Peabody	
BSE TO THE TRANSPORT	BSE	BSE	BSE Star		BSE	
Si 100,m	Si Sam	Si	51. 100.m		Si 553/m	
Fe	Fe	Fe	Fe 100µm	. Fe 500m	Fe 	
Ca 1054m		Ca	Ca 9- 100µm	Ce	Ca <u>soom</u>	
S	Sum 1 100 dat	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	S 100µm	S 	S 200-	

Abbildung 4: Gekühlte Depositionen mit Auslagerungszeiten/Dampftemperaturen von 231h/690°C bei Pittsburgh#8, 3h/480°C bei Calentur, 4h10min/480°C bei Peabody und ungekühlte Depositionen mit Auslagerungszeiten/ Sondentemperaturen von 20min/990-1113°C bei Pittsburgh#8, 30min/950-1065°C bei Calentur und 30min/950-1050°C bei Peabody; Rauchgastemperatur im Bereich von 950°-1113°C

Initialschichtcharakteristik:

Wie in Abbildung 4 zu sehen, wurden viele eisenreiche Partikel (Fe_2O_3 : 75 Ma.-%; SiO_2: 18 Ma.-%; Al₂O₃: 7 Ma.-%) auf den Initialschichten der drei Steinkohlen Pittsburgh#8, Calentur und Peabody festgestellt. Um eine genauere Aussage über die Zusammensetzung der abgelagerten Partikel machen zu können wurden mit den Proben Punktanalysen an charakteristischen Phasen durchgeführt. Hierfür wurden mehrere Stellen an den einzelnen Proben erforscht und an allen untersuchten Stellen wurden geschmolzene runde eisenreiche Partikel beobachtet. Die eisenreichen Partikel in den Initialschichten zeigten eine Größe von etwa 15-100 μ m. Daher kann davon ausgegangen werden, dass bei der Bildung dieser Depositionen der Transportmechanismus "inertial impaction" (zu Deutsch: Aufprall) eine sehr wichtige Rolle spielt. Die gekühlte Deposition zeigt, dass vor dem Auftreffen der Partikel auf die Sonde bereits viele eisenreiche Partikel als Schmelze vorliegen. Dies kann durch die sphärische und viskos verformte Deformation der eisenreichen



Partikel abgeleitet werden. Diese Annahme kann durch die in dem Partikel aufgeplatzten Gasblasen und durch die Partikel, die eine Art Brücke bilden, bekräftigt werden. Zwischen den Brücken und den sphärischen Partikeln sind sehr viele silizium- und aluminiumreiche feine Partikel eingebunden. Der Anteil an SiO₂ beträgt 56 Ma.-% und der Anteil an Aluminium etwa 35 Ma.-%; der Rest ist hauptsächlich aus Kalium und Eisen.

Zusätzlich zu den eisenreichen Partikeln wurde auch eine dünne, durchgehend eisenreiche Schicht (etwa 20 μ m) direkt auf den Werkstoffoberflächen des ferritischen Rohrwerkstoffes festgestellt. Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass diese Schicht aus der äußeren Oxidschicht des Werkstoffs hervorgegangen ist (zu sehen bei Calentur und Peabody in Abbildung 4). Da Nickelbasiswerkstoffe keine starke äußere Oxidschicht aufbauen, konnte dieses Phänomen bei der Initialschichtbildung des Nickelbasiswerkstoffs bei der Pittsburgh#8 nicht beobachtet werden.

Deckschicht:

Einige wenige sphärische Partikel werden bei der Deckschicht der Pittsburgh#8-Kohle festgestellt. Für alle drei Kohlen werden im Vergleich zur Initialschicht kaum Partikel mit hohem Anteil von Eisen festgestellt. Eisen ist in der Deckschicht mit etwa der Konzentration, wie diese auch in der Flugasche an der gleichen Stelle zu finden ist, homogen in der Schmelze vorzufinden. Diese homogene Verteilung an Eisen ist in Abbildung 4 in den Schmelzphasen vor allem bei Calentur und Peabody deutlich zu sehen. Die geschmolzenen Phasen enthalten einige nicht geschmolzene Quarzpartikel mit einem SiO_a-Anteil von etwa 99 Ma.-%. Der deutlich höhere Anteil an Schmelze in der Deckschicht der Peabody und Calentur-Kohle im Gegensatz zu der Deckschicht der Pittsburgh#8-Kohle wird durch den höheren Anteil an Fe₂O₃ und CaO in der Asche erklärt. Die Deckschicht zeigt eine poröse und leichtbrüchige Deposition. Die Partikel waren sehr lose gebunden. Aufgrund der hohen Temperaturen (990°C bis 1100°C) an der Oberfläche der ungekühlten Deposition werden die Erweichungs- und sogar Schmelzpunkte der bereits abgelagerten Partikel auf der Sonde erreicht. Aufgrund vorhandener Schmelzanteile an der Oberfläche der Sonde neigen die meisten Flugascheteilchen im Rauchgas, die dort hingelangen anzuhaften. Aufgrund dieses Phänomens zeigt die Deckschicht im Gegensatz zur Initialschicht nahezu die gleiche chemische Zusammensetzung wie der Flugstaub, der an der gleichen Stelle beprobt wurde.

Um diese Ergebnisse zu untermauern, wurden zusätzlich zu den erzeugten Elementverteilungsbildern zahlreiche Punktanalysen vorgenommen. Die Massengehalte an SiO₂, Fe₂O₃ und Al₂O₃, die aus der Punktanalyse für die ausgewählten Punkte hervorgegangen sind, wurden auf 100% normiert und in einem Dreistoffsystem aufgetragen (siehe Abbildung 5). Es ist zu erkennen, dass die Partikel der gekühlten Deposition reich an Eisen und arm an Silizium sind. Die ungekühlte Deposition zeigt Partikel, die reich an Silizium und Aluminium sind.





Abbildung 5: Dreistoffsystem des SiO₂-Al₂O₃-Fe₂O₃ der gekühlten und ungekühlten Depositionen aus dem Überhitzerbereich im untersuchten Heizkraftwerk für die drei Steinkohlen Pittsburgh#8, Calentur und Peabody

In Abbildung 6 wird die chemische Zusammensetzung der Initial- und Deckschichten mit dem Flugstaub bzw. mit der E-Filterasche verglichen.



Abbildung 6: Gegenüberstellung der chemischen Zusammensetzung der Initialschichten und der Deckschichten mit den Flugstäuben

Die Entnahme des Flugstaubes erfolgte für die Pittsburgh#8 und Calentur an der gleichen Stelle, an der die Initialschichten und Deckschichten beprobt wurden. Aus technischen Gründen konnte für die Peabody-Kohle kein Flugstaub beprobt werden und daher wurde für den Vergleich die E-Filterasche herangezogen. Der Vergleich der Deckschichten mit den Flugstäuben zeigt für alle drei Kohlen, dass die Zusammensetzung der Decksichten sich nur geringfügig von der Zusammensetzung der Flugstäube unterscheidet, während für die Initialschichten eine Anreicherung an Eisen, Kalzium und geringfügig an Magnesium beobachtet wird.



5.2 Modellbildung

Im Rahmen dieses Projekts wurde der Postprozessor des Feuerraumsimulationsprogramms AIOLOS weiterentwickelt. Im Folgenden werden die wesentlichen Änderungen zusammengetragen. Eine ausführliche Beschreibung mit entsprechender Bewertung wird in einem gesonderten Bericht ausgeführt.

5.2.1 Fragmentierung

Der Postprozessor ging bisher von der Annahme aus, dass ausgehend von einem Brennstoffpartikel genau ein Aschepartikel gebildet wird. Dieses Full-Coalescence-Modell berücksichtigt dementsprechend nicht die während der Verbrennung stattfindenden Umwandlungsvorgänge (Fragmentierung/Koaleszenz). Im Rahmen dieses Projekts wurde in den Postprozessor ein Modell zur Beschreibung dieser Phänomene implementiert. Das Modell geht davon aus, dass beim Erreichen eines bestimmten Koksausbrandes das Mutterpartikel in drei bis fünf Kinderpartikel zerfällt. Dieses Modell stellt eine erste Annäherung an diese Phänomene dar. Einige Literaturstellen gehen sogar von bis zu 200 Kinderpartikeln aus, was bei einer Berechnung von 500.000 Partikeltrajektorien zu insgesamt 100 Millionen Partikeln führen würde. Da bei der Partikelbahnberechnung zusätzlich mehrere Eigenschaften (Temperatur, Konzentration, Position etc.) gespeichert werden müssen, steht der erforderliche Speicherplatzbedarf dem entgegen.

5.2.2 FactSAGE

Im Rahmen dieses Projektes wurde die bisher rudimentäre Anwendung von FactSAGE ausgebaut. Die Anwendungsmöglichkeiten wurden weiter ausgeschöpft bzw. intensiviert. In den Simulationen wurden früher jeweils Einzelberechnungen zur Vorhersage des Ascheschmelzverhaltens durchgeführt. Zur Charakterisierung der Haftwahrscheinlichkeit wurde zwischen 10% und 70% Schmelzphasenanteil ein linearer Zusammenhang der Haftwahrscheinlichkeit angenommen. Bei der Betrachtung unterschiedlicher Kohlen stellte sich bei dieser Annahme ein unbefriedigendes Ergebnis heraus. Aus diesem Grund wurden die Kurven gefittet und mathematisch beschrieben. Diese Zusammenhänge werden nun während der Programmlaufzeit aufgerufen. Zusätzlich wurde die Möglichkeit zur Makroprogrammierung ausgenutzt. Nach Eingabe der Randbedingungen musste bisher der Anwender warten, bis diese beendet waren bevor eine neue gestartet werden konnte. Durch das Erstellen von Makros ist es nun möglich, eine Vielzahl von Sensitivitätsuntersuchungen vorzubereiten und anwenderunabhängig zu durchlaufen.

Außerdem wurde eine Schnittstelle zwischen AIOLOS und FactSAGE programmiert. Mit Hilfe der berechneten Partikeltrajektorie kann unter Annahme des thermodynamischen Gleichgewichts an vorgegebenen Stützstellen die Mineralumwandlung nachverfolgt werden.



5.3 Simulation der Kraftwerks Altbach/Deizisau HKW2

Das HKW2 Altbach/Deizisau wurde mit der CFD-Software AIOLOS simuliert. Dieser Kessel wurde in der Vergangenheit am IFK bereits mehrmals zur Validierung der Software herangezogen [26-29]. Ziel der Simulationen ist es den Einfluss verschiedener Parameter auf das Verschlackungsverhalten herauszuarbeiten. Das für die Simulationen erstellte CFD-Modell besteht aus insgesamt 18 Einzelgebieten. Dabei wurden die Brenner und die entsprechenden Nahfelder detailliert aufgelöst. Das Gebiet umfasst ca. 5 Mio Zellen (Abbildung 7).

Eine Rechnung auf einem Höchstleistungsrechner (NEC SX-9) erfordert ca. 24 Stunden netto. Das Postprozessing mit ca. 640.000 berechneten Partikeltrajektorien und insgesamt 3000 Zeitschritten wird auf dem institutseigenem Rechnercluster durchgeführt; diese Simulation dauert ca. 12 Stunden.





Abbildung 8: Schmelzphasenverhalten eingesetzter Kohlen (mit Factsage berechnet)

Mit dem Industriepartner wurde vereinbart, dass ausgehend von einem Referenzfall weitere Simulationen des HKW2 durchgeführt werden. Für jeden dieser Fälle wurden die Luftmengen, die Brennstoffmenge und auch die thermischen Randbedingungen konstant gehalten. Es wurden u.a. Simulationen mit drei unterschiedlichen Steinkohlen (Calentur, Pittsburgh#8, Peabody) durchgeführt; weitere Parametervariationen werden bis zum Ende der Projektlaufzeit abgeschlossen. Außerdem wurde für den Referenzzustand der Drallwinkel der Stufen- und Mantellüfte variiert (bis zu 20%), um die Sensitivität unterschiedlicher Brennergeometrien festzustellen. Es wurde auch das Verhältnis der Massenströme der Stufen- und Mantelluft verändert. Diese Variationen wurden hauptsächlich an der untersten Brennerebene, an der Profilmessungen vorlagen, durchgeführt.

Als Referenzzustand wurde ein Volllastzustand, bei dem die Steinkohle Calentur gefahren wurde, ausgewählt. Die Güte der Referenzsimulation wurde durch den Abgleich mit den durchgeführten Rauchgasmessungen sichergestellt. Die Ergebnisse der vorläufigen Va-



riationsrechnungen sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Diese sind jeweils auf den Referenzzustand bezogen. Q_g bezeichnet den über die Einlässe eingetragenen Wärmestrom und "Haft" die aufsummierten Depositionen auf den Brennkammerwänden. Exemplarisch ist in Abbildung 9 der Temperaturverlauf in einer vertikalen Schnittebene und in Abbildung 10 die Haftraten an der Rückwand – jeweils für den Referenzzustand und bis zur Höhe von 28m – dargestellt.

Variante		Q _B	Haft
Ref	Volllast, Calentur	1,00	1,00
01	Brennstoff: Peabody	1,00	1,77
02	Brennstoff: Pittsburgh#8	1,05	1,47
03	Drall Stufenluft 1,2	1,00	1,24
04	Drall Stufenluft 0,8	1,00	0,70
05	Mantelluft +2,5%	1,00	1,24
06	Mantelluft +5,0%	1,00	1,52

Tabelle 1: Übersicht über einige der durchgeführten Variationsrechnungen







Die drei Steinkohlen unterscheiden sich in ihren anorganischen Substanzen und dadurch in ihrem Ascheschmelzverhalten. In Abbildung 9 ist die für die Berechnung der Haftwahrscheinlichkeit verwendete Abhängigkeit des Schmelzphasenanteils von der Temperatur der jeweiligen Aschen aufgetragen. Die dargestellten Verläufe werden durch die am LES durchgeführten Analysen bestätigt. Die Peabody- und Calentur-Kohle verhalten sich ähnlich, wobei für Letztere im Bereich von 840° bis 1200°C ein höherer Schmelzphasenanteil vorausgesagt wird. Das Aufschmelzen der Pittsburgh#8-Kohle beginnt erst ab 1110°C, somit schmilzt sie im vorliegenden Temperaturbereich nicht vollständig auf.



Aufgrund der unterschiedlichen Heizwerte und dem konstant gehaltenen Brennstoffmassenstrom ist der Wärmeeintrag Q_B unterschiedlich. Während dieser im Falle von Peabodyund Calentur-Kohle noch vergleichbar ist, ändert sich Q_B bei Pittsburgh#8 spürbar, was zu einer höheren Brennkammerendtemperatur führt, was sich wiederum auf den Schmelzphasenzustand und somit auf die Haftwahrscheinlichkeit auswirkt. Zusätzlich unterscheiden sich die Brennstoffe in ihrem Ascheanteil. Dieser ist bei Pittsburgh#8 etwas höher als beim Referenzfall mit Calentur-Kohle und deutlich höher als bei Peabody-Kohle (siehe Bericht zu BW L 26DE). Dadurch sind die höheren Ablagerungen zu erklären (siehe Tabelle 1). Abbildung 11und 12 stellen die Verteilung der Haftraten auf der Rückwand für die Variantenrechnungen mit Peabody- und Pittsburgh#8-Kohle dar. Aufgrund des höheren Wärmeeintrages sind die Temperaturen im Brennergürtel bei Pittsburgh#8 höher als bei Peabody, so dass die Aschepartikel den Schmelzphasenbereich, obwohl dieser erst bei höheren Temperaturen beginnt, dennoch erreichen. In Richtung der Bündelheizflächen sinken die Temperaturen, so dass sich dort weniger Partikel ablagern. Bei Peabody sind die Ablagerungen dagegen über einer größeren Fläche der Brennkammerwand verteilt.



Abbildung 11: Depositionen auf der Rückwand (Peabody, Variante 01)

Abbildung 12: Depositionen auf der Rückwand (Pittsburgh#8, Variante 02)

Bei den Varianten 03 und 04 wurde der Drallwinkel der Stufenluft der ersten Brennerebene um 20 % vergrößert bzw. verringert. Der größere Winkel in Variante 03 führt zu einer Aufweitung der Flamme und zu einer Vergrößerung des Tangentialkreises, so dass dieser näher an die Wände gedrückt und der Einfluss der Seitenwandlüfte verkleinert wird, somit kommen mehr Partikel mit der Wand in Berührung und können sich dementsprechend ablagern. Dies zeigt sich an der höheren Haftrate im Vergleich zum Referenzfall (Spalte "Haft" in Tabelle 1). Wird der Drallwinkel dagegen verkleinert, bildet sich die Flamme eher im Innern des Feuerraums aus, wodurch weniger Partikel an die Wände gelangen.

Die Sekundärluft wird bei den im HKW2 installierten SM4-Brennern über die Stufen- und die Mantelluft in die Brennkammer eingetragen. Das Verhältnis beträgt in etwa 3 zu 1. Für die Simulationen wurden bei den Varianten 04 und 05 2,5 % bzw. 5 % der Stufenluft zur Mantelluft verschoben. Aufgrund der größeren Verdrallung der Mantelluft zeigte sich ein ähnlicher Effekt wie bei der Variante 03 (Aufweitung der Flamme). Die vorhergesagten Depositionen erhöhen sich dadurch in beiden Fällen im Vergleich zum Referenzfall.



5.2 Ausblick

Bei weiteren Simulationsrechnungen sollten Betriebseinstellungen wie z.B. das Verhältnis von Mantel- zu Stufenluft oder der Massenstrom der Seitenwandlüfte im Hinblick auf das Verschlackungsverhalten untersucht werden, da hierdurch die Strömung und die Rauchgasatmosphäre an der Wand wesentlich beeinflusst werden.

Leider war eine Validierung der örtlich aufgelösten Haftratenvorhersagen bislang noch nicht möglich. Eine Option könnte zukünftig darin bestehen, den Simulationsergebnissen entsprechende Bilder von Infrarotkameras gegenüberzustellen. Diese werden bereits in Expertensystemen von Kraftwerken zur Optimierung des Rußbläsereinsatzes eingesetzt [30].

Außerdem könnten bei der Berechnung der Nettohaftrate auch abbauende Effekte wie z.B. Erosion, Aschesturz und Rußbläsereinsatz berücksichtigt werden. Ausgehend von der simulierten Nettohaftrate ist es dann möglich, die Schichtdicke über die Zeit zu berechnen und so den Einfluss einer sich aufbauenden Depositionsschicht, aber auch von Reinigungsmaßnahmen auf den Betrieb der Anlage zu simulieren.

6 Wesentliche terminliche und inhaltliche Abweichungen zum Projektantrag

Eine abschließende Zusammenstellung und Bewertung aller Projektergebnisse im Rahmen eines ausführlichen Berichtes (Umfang: 63 Seiten) konnte erst nach dem Projektende fertig gestellt werden.

7 Publikationen und Patente

7.1 Im Rahmen des Projektes entstandene Publikationen

7.1.1 Begutachtete Publikationen

- [1] Babat, S.; Maier, J.; Scheffknecht, G.; Stein-Brzozowka, G.; Miller, E.: Deposition Behavior of a Bituminous Coal in a Large Pulverized Fuel Power Plant. Heat Exchanger Fouling and Cleaning, Crete Island, Greece, 2011
- [2] Lemp, O.; Schnell, U.; Scheffknecht, G.: Lagrangian Approach for the Prediction of Slagging and Fouling in Pulverized Coal Combustion. In: High-Performance-Computing in Science and Engineering '12 (Transactions of the High Performance Computing Center Stuttgart (HLRS) 2012), W.E. Nagel, D.H. Kröner, M.M. Resch (eds.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2013, pp. 207 – 220



7.1.2 Nicht-begutachtete Publikationen und eingereichte Publikationen

- [3] Babat, S.; Maier, J.; Scheffknecht, G.: Investigation of the Mineral Pyrite in Atmospheric Combustion Reactor (BTS) under Oxidizing and reducing Atmosphere, Konferenz "Impacts of Fuel Quality on Power Production and the Environment", Puchberg/Österreich, 2012
- [4] Babat, S.; Maier, J.; Scheffknecht, G.: Creelman, R.A.; Ward, C.R.: Deposition behavior of three bituminous coals in a large pilverized fuel power plant, The 38th International Technical Conference on Clean Coal & Fuel Systems, The Clearwater Clean Coal Conference, Clearwater, USA, (June 2013)
- [5] Babat, S.; Maier, J.; Scheffknecht, G.: Depositionsbildung und Charakterisierung der Ascheablagerung vor Eintritt in die Konvektionsheizflächen eines steinkohlegefeuerten Heizkraftwerks, 45. Kraftwerktechnisches Kolloqium 2013, Dresden, (10/2013)
- [6] Babat, S.; Maier, J.; Stracke, J.; Scheffknecht, G.: Untersuchung eisenreicher Beläge vor Eintritt in die Konvektionsheizflächen eines steinkohlegefeuerten Heizkraftwerks, 26. Deutscher Flammentag, Duisburg-Essen, (09/2013)

7.2 Gemeinsame Publikationen zweier oder mehrerer KW21 Teilprojekte

- [7] Wieland, C.; Spliethoff, H.; Lemp, O.; Scheffknecht, G.: Vergleichende Untersuchung von Depositionskriterien für CFD-Simulationen. 25. Deutscher Flammentag, Karlsruhe, 14.-15. September 2011; VDI-Berichte 2119, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf; ISBN: 978-3-18-092119-8; 2011
- [8] Lemp, O.; Schnell, U.; Scheffknecht, G.; Wieland, C.; Spliethoff, H.: Evaluation of Deposition Models for CFD Simulations of Coal-Fired Utility Boilers. Konferenz. 1st ERCOFTAC Conference on Simulation of Multiphase Flows in Gasification and Combustion, Dresden, 2011.

7.3 Weitere Publikationen

- [9] Zelkowski, J.: Kohleverbrennung Brennstoff, Physik und Theorie, Technik. Band 8 der Fachbuchreihe Kraftwerkstechnik, Herausgeber: VGB e.V. 1986.
- [10] Heinzel T.: Ascheseitige Probleme bei der Mitverbrennung von Biomasse in Kohlenstaubfeuerungen. Dissertation Universität Stuttgart, Shaker Verlag, 2003, ISBN 3-8322-2632-X
- [11] Thornock, D.E.; Borion, R.W.: Developing a Coal Quality Expert: Combustion and Fireside Performance Characterization Factors. Topical report on coals from public service of Oklahomas's northeaster station, 1992.
- [12] Bryers, R.W.: Factors Critically Affecting Fireside Deposits in Steam Generators. Impact of Minera Impurities in Solid Fuel Combustion, edited by Gupta et al. Kluwer Academic / Plenum Publishers, New York, pp. 105-131, 1999.
- [13] Zbogar A. et al.: Shedding of ash deposits. Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 35, pp. 31-55, 2009.

- [14] Ultra-Systems Technology, Fuel & Power Experts: http://www.ultrasys.com.au/ bits.aspx#iron, 23.11.2,12, 12:22 Uhr
- [15] McLennan, A.R.; Bryant, G.W.; Stanmore, B.R.; Wall, T.F.: Ash Formation Mechanisms during pf. Combustion. Energy & Fuels, Vol. 14, No.1, 2000.
- [16] Srinivasachar, S.; Boni, A. A.: A kinetic model for pyrite transformations in a combustion environment. Fuel 68 (1989), 829.
- [17] McLennan, A. R.: Ash formation in reducing conditions. Ph.D. Thesis, University of Newcastle, Newcastle, Australia, 1998.
- [18] Richter, S: Numerische Simulation der Flugaschedeposition in kohlestaubgefeuerten Dampferzeugern. Dissertation, Universität Stuttgart, 2002.
- [19] Bozic, O.: Numerische Simulation der Mineralumwandlung in Kohlenstaubfeuerungen, Dissertation, TU Braunschweig, 2003
- [20] Magda, S: Modelling of transformation and deposition of alkaline compounds under combustion conditions, Dissertation, TU Braunschweig (Veröffentlichung vorauss. 2012)
- [21] Strelow, M.: Mineralumwandlung in Feuerungen, Dissertation, TU Braunschweig (Veröffentlichung vorauss. 2012)
- [22] Walsh, P.M.: Fouling of Convection Heat Exchangers by Lignitic Coal Ash. Energy & Fuels, pp. 6:709, 1992.
- [23] Frandsen, F. et al: Characteristation of ashes from biofuels. Final Report from EFP-95, The Danish Energy Research Programme. Jornal no. 1323/95-0007, ISBM 87-7782-000-2, 1998.
- [24] Jak, Evgueni: Prediction of coal ash fusion temperatures with the F*A*C*T thermodynamic computer package. Fuel, Vol. 81, 1655 -1668, 2002.
- [25] Walsh, P.M.: Fouling of Convection Heat Exchangers by Lignitic Coal Ash. Energy & Fuels, pp. 6:709, 1992.
- [26] Sauer, C.: Detaillierte gekoppelte Simulation von Kraftwerksfeuerung und -dampferzeuger. Dissertation, Universität Stuttgart, 2007.
- [27] Ströhle, J.: Spectral Modelling of Radiative Heat Transfer in Industrial Furnaces. Dissertation, Universität Stuttgart, 2004.
- [28] Risio, B.: Effizienz und Verläßlichkeit numerischer Vorhersagen zur rechnergestützten Optimierung von Großkraftwerksbrennkammern, Dissertation, Universität Stuttgart, 2001.
- [29] Sabel, T.: Betriebsoptimierung von Kohlekraftwerksfeuerungen durch Experiment und Simulation. Dissertation, Universität Stuttgart, 2001.
- [30] Bartels, D. et al: Gezielter Einsatz von Diagnostik und Analysesoftware zur intelligenten On-load Kesselreinigung. Vortrag, 35. Kraftwerkstechnisches Kolloquium, Dresden, 2012.

7.4 Im Rahmen des Projektes entstandene Patente

Patente sind im Rahmen dieses KW21-Teilprojektes nicht entstanden.



8 Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses

8.1 Studentische Mitarbeiter

D. Husic Unterstützung bei der Programmierung einer Brennstoffdatenbank

8.2 Studien-, Semester- und Bachelorarbeiten

Erkan Can Untersuchung des Pyrits in der BTS unter oxidierender und reduzierender Atmosphäre (Studienarbeit)

Matthias Ruttkowski Bestimmung des Verschlackungsverhaltens der Steinkohle (Peabody) in einem Kohlekraftwerk (Studienarbeit)

Lu Han Fragmentation and coalescence of inorganic components during pulverized coal combustion – Development of Conceptual Design for Implementation in CFD Software AIOLOS (Semesterarbeit)

8.3 Diplom- und Masterarbeiten

Wolfgang Haaß Implementierung einer Schnittstelle zur thermodynamischen Stoffdatenbank F*A*C*T in das 3D-Verbrennungssimulationsprogramm AIOLOS (Masterarbeit)

8.4 Promotionen

- [31] Akbar, S.: Numerical Simulation of Deposit Formation in Coal-Fired Utility Boilers with Biomass Co-Combustion. Dissertation, Universität Stuttgart, 2011
- [32] Lemp, O.: Modellgestützte Vorhersage von Verschmutzungen und Verschlackungen in kohlestaubgefeuerten Kraftwerke, Dissertation Universität Stuttgart (in Vorbereitung)

9 Forschungsprogramme des Bundes und der EU

9.1 Angaben, ob weitere Drittmittel zum Projektthema eingeworben wurden, insbesondere aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen des Bundes und der EU

COORETEC: Verbundprojekt "Korrosion und Verschlackung in Hochtemperaturkraftwerken mit neuen Werkstoffen"

> "CLOCK" Chemical Looping Combustion von Kohle zur CO₂-Abscheidung in atmosphärischen Wirbelschichtreaktoren für einen Dampfkraftprozess

"ADECOS-ZWSF" Weiterentwicklung und Untersuchung des Oxyfuel-Prozesses mit Zirkulierender Wirbelschichtfeuerung auf Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit



Beteiligung an diversen Projekten des 6. und 7. Rahmen- programms, RFCS Förderprograms teilweise als Koordinator, u.a. an folgenden früheren und noch laufenden Projekten:
"CaOLing" (Development of post-combustion CO ₂ capture with CaO in a large testing facility)
"CAL-MOD" (Modeling and experimental validation of Calcium Looping CO_2 -capture process for near-zero CO_2 emission power plants)
"C3-Capture" (Calcium Cycle for Efficient and low Cost CO_2 Capture Using Fluidized Bed Systems)
"FLOX-COAL" (Development of a Pilot-Scale Flameless Oxidation Burner for Ultra Low NO_x Combustion of Pulverized Coal)
"OxyBurner" (Development of Advanced Large Scale Low NO _x Oxy-Fuel Burner for PF Combustion)
"OxyMod" (Development and Experimental validation of a Mathematical Modelling Methodology for Oxy-Fuel Combustion for CO ₂ Capture)
"ENCAP" (Enhanced Capture of CO ₂)
"OxyCorr" (Boiler Corrosion under Oxy-fuel Conditions)
"DEBCO" (Demonstration of Large Scale Biomass Co-Firing and Supply Chain Integration)
"RECOMBIO" (Recovered Fuels combined with Biomass)
"DENOPT" (Optimisation of SCR-DeNO _x Catalyst Performance related to Deactivation and Mercury Oxidation)
"RECOFUEL" (Solid Recovered Fuels)

9.2 Geplante Antragsstellung bzw. künftige Förderung aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen

Basierend auf den im Projekt gewonnenen Erkenntnissen soll ein Forschungsantrag im Rahmen der COORETEC-Initiative des BMWi gestellt werden. Für die Fortsetzung der Untersuchungen zur Verschlackungs- und Verschmutzungsproblematik haben bereits mehrere Partner ihr Interesse an der Fortführung der Zusammenarbeit bekundet.



Arbeitskreis Kraftwerkssysteme und Dampferzeuger

Projekt: BW L 27DE

Grundlegende experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Entwicklung von innovativen Brennertechnologien und Feuerungskonzepten für den Einsatz in CO_2 -armen Kohlekraftwerken (Oxyfuel-Kraftwerken)

Projektleiter:	Prof. Dr. techn. Günter Scheffknecht			
	Prof. DrIng. Uwe Schnell			
	DiplIng. Jörg Maier			
	Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) Universität Stuttgart			
Mitarbeiter:	DiplIng. (FH) Simon Grathwohl			
	DiplIng. Michael Müller			
Finanzierung:	Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg			

1 Ausgangssituation

Eine Vielzahl von Forschungsarbeiten beschäftigt sich mit der CO₂-Reduktion bei fossil befeuerten Kraftwerken. Die hauptsächlichen Forschungsschwerpunkte liegen dabei auf der Erhöhung der Anlageneffizienz, der Pre-Combustion-Capture, der Post-Combustion-Capture und der Oxyfuel-Verbrennung (sog. Carbon-Dioxide-Capture & Storage- bzw. CCS-Verfahren). Ein vereinfachtes Schema des Oxyfuel-Prozesses in Verbindung mit einem kohlegefeuerten Dampferzeuger ist in Abbildung 1 dargestellt.





Abbildung 1: Vereinfachtes Schema des Oxyfuel-Prozesses im Kraftwerk

Die Grafik zeigt die aufeinanderfolgenden Stufen des Gesamtprozesses: Luftzerlegung, Kohleverbrennung mit Rauchgasrezirkulation, Abgasaufbereitung und CO₂-Abtrennung bzw. -Speicherung. Mit den zusätzlich erforderlichen Prozessschritten geht eine Erhöhung der Eigenbedarfsleistung des Kraftwerks um ca. 7-11 % im Vergleich zum konventionellen, kohlegefeuerten Dampferzeuger einher [1]. Dennoch wird der Oxyfuel-Prozess als vergleichsweise kosteneffizientes CCS-Verfahren betrachtet [8, 9, 10]. Ein weiterer Vorteil der Oxyfuel-Verbrennung besteht darin, dass bestehende fossil befeuerte Kraftwerke mit Hilfe mehr oder weniger aufwändiger Modifikationen für den Oxyfuel-Prozess umgerüstet werden können.

Weltweit laufen derzeit vielfältige Forschungsarbeiten im Bereich der Oxyfuel-Verbrennung mit dem Ziel der großtechnischen Umsetzung des Prozesses. Einen guten Überblick über die internationalen Forschungsaktivitäten im Bereich des Oxyfuel-Prozesses findet sich auf der IEA-Website des IEA Greenhouse Gas R&D Programme [11]. Weitere Einund Überblicke in laufende Forschungsaktivitäten geben Buhre [12], Wall [13] und Toftegaard [14]. Ein Großteil der diskutierten und untersuchten Konzepte zielt dabei auf eine Anpassung der Oxyfuel-Prozesse an die heutige Dampferzeuger- und Kraftwerkstechnik [15, 16] ab.

Während der Oxyfuel-Verbrennung wird die Kohle mit einer Mischung aus reinem Sauerstoff und rezirkuliertem Rauchgas verbrannt. Das rezirkulierte Rauchgas ist notwendig, um eine ähnliche Volumenstrom- und Temperaturverteilung zu erzielen, wie sie bei der Auslegung heutiger konventioneller Kohlekraftwerke erreicht wird. Vor diesem Hintergrund besteht das Rauchgas hauptsächlich aus CO_2 und Wasserdampf sowie in geringen Anteilen aus O_2 , Ar, N_2 , NO_x , SO_x und weiteren gasförmigen und partikulären Bestandteilen aus dem Brennstoff.

Durch die Kondensation des Wasserdampfs wird nahezu reines CO_2 produziert. Dieses kann verflüssigt und zu seiner Endlagerung transportiert werden. CO_2 -Konzentrationen von 95 Vol.-% (trocken) und höher können erreicht werden. Hierzu ist es aber notwendig, Sauerstoff mit möglichst geringem Anteil an Verunreinigungen einzusetzen sowie sicherzustellen, dass Umgebungsluft nicht in die Anlage eindringen kann.



Ein weiterer Vorteil des Oxyfuel-Prozesses – neben der CO_2 -Abscheidung – ist die Reduktion des emittierten Rauchgasvolumenstroms. Die Kosten reduzieren sich somit für die mit diesem Volumenstrom beaufschlagten Rauchgasreinigungskomponenten.

Zur grundlegenden experimentellen Untersuchung der Oxyfuel-Verbrennung von Steinkohle steht am IFK ein elektrisch beheizter Verbrennungsreaktor (20 kW_{th}) zur Verfügung. Für den Oxyfuel-Prozess wurde eine eigene Infrastruktur für die O₂- und CO₂-Versorgung geschaffen, um die Anlage mit den notwendigen Gasen zu versorgen. Dieser Verbrennungsreaktor ermöglicht somit sowohl gestufte als auch ungestufte Verbrennung unter Oxyfuel-Bedingungen bei unterschiedlichen O₂-Konzentrationen im Verbrennungsgas. Des Weiteren besteht die Möglichkeit zusätzliche Gaskomponenten, wie SO_x, NO, HCI etc. dem Verbrennungsgas beizumischen und das Verhalten dieser Komponenten im Oxyfuel-Betrieb zu untersuchen.

Für die Untersuchung des Oxyfuel-Prozesses im halbtechnischen Maßstab wurde eine 500 kW_{th} Kohlestaubfeuerung für den Oxyfuel-Betrieb umgerüstet. Damit wurden bereits mehrere hundert Stunden Versuchsbetrieb mit unterschiedlichen Forschungsschwerpunkten durchgeführt und somit konnten weitere wertvolle Betriebserfahrungen unter Oxyfuel-Bedingungen gewonnen werden [6].

Das am IFK vorhandene Wissen, die Erfahrungen und die Anlagentechnik bieten somit eine ideale Basis, um die vielversprechende Oxyfuel-Verbrennung feuerungsseitig gezielt zu untersuchen.

Neben den experimentellen Versuchsanlagen wird in der Abteilung "Feuerungs- und Dampferzeugersimulation" des IFK seit vielen Jahren die Modellierung und Simulation von Verbrennungsvorgängen durchgeführt. Hierfür steht das eigenentwickelte Verbrennungssimulationsprogramm AIOLOS zur Verfügung, welches im Zuge früherer Forschungsarbeiten bereits gezielt hinsichtlich der Oxyfuel-Verbrennung weiterentwickelt wurde [27]. Der CFD-Code AIOLOS wurde speziell zur Simulation von Kohlestaubfeuerungen entwickelt und beschreibt demnach die wesentlichen physikalisch-chemischen Vorgänge in Bezug auf Strömungsmechanik, Wärmeübertragung und Reaktion während des Verbrennungsprozesses.

2 Projektziele

Ziel des Projektteils BW L 27DE ist es, die Forschungsarbeiten im Bereich der Oxyfuel-Verbrennung weiter voranzutreiben und zu optimieren. Frühere und laufende Forschungsarbeiten konzentrieren sich überwiegend auf die Schadstoffbildung und das Abbrandverhalten bei Einsatz von Braunkohle aus dem Lausitzer Revier. In diesem Projekt liegt der Schwerpunkt auf der Nutzung von Steinkohle als Brennstoff.

Die bisher üblichen Konzepte von Oxyfuel-Prozessen sehen für die Verbrennung hohe Mengen an extern rezirkuliertem Rauchgas vor, um die Flammentemperaturen auf ähnliche Werte wie bei der Luftverbrennung abzusenken. Im Mittelpunkt der Untersuchungen stehen insbesondere Brenner- und Feuerungskonzepte, bei denen die bestehenden positiven Erkenntnisse der Luft- und Brennstoffstufung unter Oxyfuel-Bedingungen konsequent angewendet und weiterentwickelt werden. Eine stabile Zündung, eine kontrollierte Wärmefreisetzung, eine geringe Schadstoffbildung sowie die Gewährleistung eines vollständigen Brennstoffumsatzes sind hierbei wesentliche Randbedingungen für den Erfolg eines Konzepts.



Grundlegende experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Entwicklung von innovativen Brennertechnologien und Feuerungskonzepten werden an einem elektrisch beheizten 20 kW_{th} Flugstromreaktor durchgeführt. Ziel ist hierbei vor allem die Charakterisierung der Schadstoffbildung unter Oxyfuel-Bedingungen. Weiter werden CFD-Modelle weiterentwickelt, um die Verbrennung von Steinkohle unter Oxyfuel-Bedingungen wiedergeben zu können. Daraufhin werden ausgewählte Versuche der im experimentellen Teil verwendeten Testanlage zur Validierung der CFD-Modelle herangezogen und die hierbei erfassten Messdaten den Simulationsergebnissen gegenübergestellt.

2.1 Umsetzung der Hinweise aus den bisherigen Begutachtungen

Die allgemein positive Beurteilung wurde angenommen und die Hinweise aus vorigen Begutachtungen wurden beachtet. Die Annahme, dass weitere Dissertationen aus diesem Projekt entstehen werden, ist zutreffend. Die positiv bewertete Zusammenarbeit mit der TU München wurde fortgesetzt und die Modellimplementierung konnte weitgehend erfolgreich abgeschlossen werden.

3 Vernetzung

3.1 Vernetzung innerhalb KW21

Die bereits in der ersten KW21-Phase intensivierte Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Energiesysteme (LES) der TU München wurde im Rahmen der Oxyfuel-Projekte der zweiten KW21-Phase fortgesetzt. Die bestehenden persönlichen Kontakte zwischen den Antragstellern und Mitarbeitern der Institute erleichtern die Zusammenarbeit und Verknüpfung der Einzelvorhaben. Im Zuge dieser Kooperation zwischen IFK und LES (KW21-Projekt "Kontrolliert gestufte Oxycoal-Verbrennung") sollte somit ein innovatives und im halbtechnischen Maßstab erprobtes Brenner- und Feuerungskonzept für den Oxyfuel-Prozess erarbeitet werden.

Des Weiteren wurde eine Zusammenarbeit mit dem Institut für Thermische Strömungsmaschinen und Maschinenlaboratorium (ITSM, Universität Stuttgart) initiiert. Dieses Institut ist ebenfalls mit mehreren Teilprojekten in KW21 vertreten. In Zusammenarbeit mit dem ITSM wurde die Strömungsmesstechnik in Form von Mehrlochsonden erweitert, um Strömungsmessungen im Brennernahfeld von Oxyfuel-Brennern durchführen zu können. Die Ergebnisse lieferten einen wertvollen Beitrag für die Simulationsrechnungen.

3.2 Vernetzung außerhalb KW21

Das IFK beschäftigt sich seit mehreren Jahren mit der Oxyfuel-Verbrennung und war dabei in mehreren europäischen Forschungsprojekten (ENCAP, Oxyburner, Oxymod) involviert.



4 Vorgehensweise und Methodik

4.1 Experimentelle Untersuchung (20 kW_{th} Verbrennungsreaktor)

Zur experimentellen Grundlagenuntersuchung der Oxyfuel-Verbrennung von Steinkohle wurden vielfältige Versuche am elektrisch beheizten Verbrennungsreaktor durchgeführt (siehe Abbildung 2). Für den Betrieb unter Oxyfuel-Bedingungen ist eine eigene Infrastruktur für die O₂- und CO₂-Versorgung eingerichtet. Der Verbrennungsreaktor ermöglicht sowohl gestufte als auch ungestufte Verbrennung unter Oxyfuel-Bedingungen bei unterschiedlichen O₂-Konzentrationen im Verbrennungsgas. Des Weiteren besteht die Möglichkeit zusätzliche Gaskomponenten dem Verbrennungsgas beizumischen und somit das Verhalten einzelner Komponenten im Oxyfuel-Betrieb zu untersuchen. Im Rahmen des Projektes wurden nun grundlegende Untersuchungen zur Charakterisierung der Schadstoffbildung unter Oxyfuel-Bedingungen durchgeführt.



Abbildung 2: Schema des elektrisch beheizten Flugstromreaktors (20 kW_{th})

4.2 Modellierung und Simulation (CFD-Code AIOLOS)

Bereits in früheren Projekten wurden einige der Teilmodelle des am IFK entwickelten CFD-Codes AIOLOS [27] gemäß den Oxyfuel-Bedingungen angepasst und gegen experimentelle Daten validiert [6]. Darauf aufbauend wurden nun im Rahmen dieses Projektteils diejenigen Modelle zur Weiterentwicklung ausgewählt, die die Umwandlung der Steinkohle charakterisieren (Pyrolyse, Koksabbrand).



5 Projektergebnisse und Ausblick

5.1 Experimentelle Grundlagenuntersuchungen

Im Verbrennungsreaktor wurden Untersuchungen zur Charakterisierung der Schadstoffbildung unter Oxyfuel-Bedingungen durchgeführt. Um das Verhalten von rezirkuliertem NO im Oxyfuel-Betrieb zu analysieren, wurde dem Verbrennungsgas in ausgewählten Fällen zusätzliches NO beigemischt. Die Schwerpunkte umfassten neben NO_x-Emissionen in Abhängigkeit der Stöchiometrie auch Profilmessungen zur NO-Bildung sowie den Abbau von rezirkuliertem NO. Dabei wurden sowohl hoch- als auch mittelflüchtige Steinkohlen eingesetzt und mit Lausitz Braunkohle verglichen. In Tabelle 1 sind die entsprechenden Brennstoffparameter aufgelistet.

	H _u	Wasser	Asche	Flüchtige	С	Н	Ν	S	0
	[kJ/kg,roh]	[%,roh]	[%,wf]	[%,waf]	[%,roh]	[%,roh]	[%,roh]	[%,roh]	[%,roh]
KK:	24361	1,98	19,02	25,05	65,61	4,07	1,65	1,17	6,72
LA:	21412	10,2	5,46	57,36	66,78	5,25	0,65	0,85	26,45
EC:	27289	1,63	11,79	32,58	74,28	4,34	1,73	0,73	5,68

Tabelle 1: Brennstoffparameter Klein Kopje Steinkohle (KK), Lausitz Braunkohle (LA), El Cerrejon Steinkohle (EC)

Einfluss von Stöchiometrie und NO-Rezirkulation: Im Folgenden werden Versuchsergebnisse mit Klein Kopje Steinkohle und Lausitz Braunkohle beschrieben. Das O_2/CO_2 -Verhältnis im Oxyfuel-Fall entspricht jeweils 27%/73% ("OF27").

In Abbildung 3 sind die NO_x-Emissionen in Abhängigkeit der Brenner-Stöchiometrien (λ =0,75-1,15) mit Klein Kopje Steinkohle dargestellt. Die Emissionen sind hierbei am Brennkammerende nach Zugabe der Ausbrandluft gemessen worden. Dabei ist ersichtlich, dass die spezifischen NO_x-Emissionen im Fall der Oxyfuel-Bedingungen generell niedriger sind als im Luft-Fall. Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass die Verweilzeit und der Stufungsgrad in beiden Betriebsmodi eine entscheidende Rolle bzgl. der NO_x-Reduktion spielen.

Die Profilmessungen für den Luft- und Oxyfuel-Fall entlang der Reaktorachse sind in Abbildung 4 dargestellt. Für die Messungen wird eine ölgekühlte Sonde von unten in den Reaktor gefahren und die jeweiligen Konzentrationen vom Reaktoraustritt (2,5 m) bis in den brennernahen Bereich (0,15 m) aufgezeichnet. Der NO-Verlauf entlang der Reaktorachse kann somit erfasst werden.





Abbildung 3: NO_x-Emissionen in Abhängigkeit der Brennerstöchiometrie (Burner Oxygen Ratio) und der Verweilzeit (Klein Kopje Steinkohle)



Abbildung 4: Profilmessungen zur Analyse der NO-Bildung, gestufter Betrieb mit Brennerstöchiometrie 0,75 (links: Luft-Fall; rechts: Oxyfuel-Fall)

Weiter wird deutlich, dass bei der Verbrennung unter Oxyfuel-Bedingungen generell höhere CO-Konzentrationen während der Brennstoffumsetzung zu erwarten sind. Hierfür sind im Wesentlichen Reaktionen verantwortlich, die bedingt durch die erhöhten CO_2 und H_2O Partialdrücke begünstigt werden. Dies gilt besonders für Vergasungsreaktionen, die zur Umsetzung des Restkokses beitragen. Demgegenüber stellt die hohe CO-Konzentration in der Flamme für die CO-Emissionen am Reaktoraustritt kein Problem dar, da nach Zugabe der Ausbrandluft die gleichen CO-Werte wie im Luft-Fall erreicht werden.

In Abbildung 5 sind die Reduktionsraten dargestellt, wenn zusätzlich NO in den Verbrennungsprozess zudosiert wird, wie dies im Oxyfuel-Prozess der Fall ist. Die Rezirkulation von Rauchgas wird hierdurch zum Teil simuliert. Zum Vergleich wurde hier außerdem Lausitz Braunkohle eingesetzt. Dabei wurden 1000 ppm NO zum einen über den Brenner, als auch in einer zweiten Variante über die Ausbrandluft zudosiert. Die Ergebnisse zeigen, dass in Abhängigkeit der Verweilzeit und Stöchiometrie bis zu 100 % des rückgeführten NO abgebaut werden kann. Das Reduktionspotential des über die Ausbrandluft zudosierten NO ist wesentlich geringer als im Falle der Zudosierung über den Brenner. Dies ist im Wesentlichen durch die geringere Verweilzeit besonders in reduzierender Atmosphäre zu erklären.




Abbildung 5: Reduktion von rezirkuliertem NO in Abhängigkeit der Brennerstöchiometrie (KK: Klein Kopje Steinkohle, LA: Lausitz Braunkohle)

Einfluss der Rauchgasrezirkulation: Anhand des Einsatzes eines neu installierten Dampferzeugers wurde der Einfluss des Betriebs feuchter Rauchgasrezirkulation gezielt untersucht. Der Wasserdampf wurde dabei mit dem Sekundärgas in die Brennkammer eingebracht. Die Zudosierung des NO (800 ppm) erfolgte dagegen im Primärgasstrom. In Abbildung 6 sind die entsprechenden Reduktionsraten bei Verbrennung von El Cerrejon Steinkohle in Abhängigkeit des O₂-Gehaltes im Oxidant dargestellt. Die Ergebnisse zeigen einerseits wesentliche Unterschiede in Abhängigkeit des Sauerstoffgehalts im Oxidant und darüber hinaus einen interessanten Einfluss des Wasserdampfgehaltes. Im Bereich des 27%-Falls, der vergleichbar mit der vorangegangenen Versuchsreihe (siehe Abbildung 5, "Unstaged"-Betrieb) ist, hatte der Wasserdampfgehalt den geringsten Einfluss auf die Reduktion des zudosierten NO. In den anderen Versuchen war dagegen ein deutlicherer Einfluss des Wasserdampfgehalts mit zum Teil gegenläufiger Tendenz zu beobachten, was jedoch nicht abschließend geklärt werden konnte.

Vergleicht man alle Fälle bezüglich der spezifischen NO_x-Emissionen (siehe Abbildung 7), werden die jeweiligen Unterschiede am deutlichsten. Alle Oxyfuel-Fälle liegen in den spezifischen NO_x-Emissionen unter dem vergleichbaren Luft-Fall. Deutlich ersichtlich ist auch der Wasserdampfeinfluss, der sich in allen Fällen (außer dem OF27-Fall) mindernd hinsichtlich der NO_x-Emissionen auswirkt.



Abbildung 6: Reduktion von rezirkuliertem NO in % in Abhängigkeit des Gesamtsauerstoffs und der Feuchte



Abbildung 7: Übersicht der spezifischen NO_x-Emissionen in Abhängigkeit der NO Eindüsung, der Feuchte und des Gesamtsauerstoffs

Zusammenfassung: Die Grundlagenuntersuchungen am 20 kW_{th} Verbrennungsreaktor haben gezeigt, dass die gestufte Betriebsweise ebenso wie bei der konventionellen Luftverbrennung auch für die Verbrennung unter Oxyfuel-Bedingungen eine vielversprechende Maßnahme zur NO_x-Reduktion darstellt. Weiterhin ist bei optimalen Einstellungen mit entsprechender Verweilzeit und Stöchiometrie auch eine wesentliche Reduktion des rezirkulierten NO möglich (bis zu 100 %). Es ist daher davon auszugehen, dass es trotz der Rezirkulation des Abgases im Oxyfuel-Betrieb bei optimierter Fahrweise nicht zu einer wesentlichen Aufkonzentrierung der NO_x-Emissionen kommt. Auch der Einfluss der Rezirkulation feuchter Rauchgase konnte untersucht werden. Die dabei wirkenden Mechanismen, die die NO-Konzentrationen teilweise stark beeinflussen, konnten jedoch nicht abschließend geklärt werden. Trotz teils gegenläufiger Tendenzen lagen die spezifischen



 NO_x -Emissionen auch hier in allen betrachteten Oxyfuel-Fällen jeweils deutlich unter denen des entsprechenden Luft-Falls. Da die absoluten Abgasmengen insgesamt stets wesentlich geringer sind als im Luft-Fall, stellt die gestufte Betriebsweise ein wesentliches Potential zur Minderung der NO_x -Emissionen bei der Verbrennung unter Oxyfuel-Bedingungen dar.

5.2 Modellentwicklung und Simulation

Im Folgenden werden die im Projekt behandelten Modelle und die entsprechend durchgeführten Erweiterungen innerhalb des CFD-Codes AIOLOS erläutert.

Pyrolyse-Modell: Um realistische Vorhersagen der Kohlekonversionsraten unter Oxyfuel-Bedingungen erzielen zu können, wurden Modellerweiterungen im Bereich der Kohlepyrolyse implementiert. Im Allgemeinen wird bei der Modellierung der Pyrolyse angenommen, dass Rohkohle unter Hitzeeinwirkung entgast; dabei bleibt Koks zurück und die freigesetzten Flüchtigen bestehen aus kondensierbaren Produkten und weiteren Gasen. Basierend auf Pyrolyseexperimenten aus der Literatur wurde eine aus 14 Kohlen bestehende Datenbank erstellt, um eine Vorhersage der Gesamtmenge der freigesetzten Pyrolysegase zu ermöglichen. Anhand dieser experimentellen Daten kann ein Zusammenhang zwischen der Flüchtigenfreisetzung und den aus der Elementaranalyse der Kohle ermittelten H/C- und O/C-Verhältnissen abgeleitet werden. Um für eine unbekannte Kohle die gesamte Flüchtigenfreisetzung näherungsweise zu bestimmen, können nun die Daten von Kohlen mit ähnlicher Lage im Inkohlungsdiagramm aus der Datenbank interpoliert werden.

Die Literaturrecherche ergab weiterhin, dass die Teerausbeute bei manchen Steinkohlen bis zu 40 % der Gesamtmenge an freigesetzten Pyrolyseprodukten ausmachen kann. Um dies berücksichtigen zu können, wurde ein semi-empirisches Modell zur Bestimmung der Teerausbeute implementiert, das die Teerausbeute ausgehend von der Elementarzusammensetzung der Kohle ermittelt [17, 25].

Koksabbrand-Modell: Außerdem wurde für die Modellierung des Koksabbrands durch die Anwendung eines mechanistischen Koksoxidationsmodells anstelle von Globalreaktionsmodellen eine umfassendere physikalische Basis geschaffen. Der konventionelle Modellansatz anhand der Betrachtung einer einzelnen globalen Reaktion (2 C_{Koks} + O₂ \rightarrow 2 CO) wurde durch einen detaillierten Mehrschritt-Mechanismus erweitert, der die Koksumwandlung anhand der folgenden drei Schritte betrachtet: (a) Adsorption des Sauerstoffs an der Koksoberfläche unter Bildung eines Gas-Komplexes C(O), (b) Komplex-Reaktion bei der sowohl CO als auch CO₂ entstehen kann, und (c) Desorption des Gas-Komplexes in gasförmiges CO [18, 25]. Daraus ergibt sich folgendes Reaktionsschema:

$$2 C_{Koks} + O_2 \rightarrow 2 C(O) \tag{1}$$

$$2 C(O) + O_2 \rightarrow 2 f_{cpl} CO + 2(1-f_{cpl}) CO_2 + f_{cpl} O_2$$
 (2)

$$2 C(O) \rightarrow 2 CO . \tag{3}$$

Der eingeführte Mechanismusfaktor f_{cpl} liegt stets zwischen 0 und 1 und wird in Abhängigkeit des Sauerstoffpartialdrucks und der Reaktionsraten der Komplex-Reaktion (2) und der Desorptionsreaktion (3) bestimmt. Damit kann schließlich sowohl die Reaktion zu CO als auch die unter Oxyfuel-Bedingungen signifikante Bildung von CO₂ während des Koksabbrands berücksichtigt werden.



Darüber hinaus wurden mit der Boudouard-Reaktion (4) und der heterogenen Wassergas-Shift-Reaktion (5) zwei zusätzliche Vergasungsreaktionen in das Koksabbrand-Modell implementiert:

$$C_{Koks} + CO_2 \rightarrow 2 CO \tag{4}$$

$$C_{Koks} + H_2O \rightarrow CO + H_2$$
(5)

Beide Reaktionen werden im Allgemeinen bei der Modellierung des konventionellen Luft-Betriebs vernachlässigt. Da unter den spezifischen Oxyfuel-Bedingungen allerdings in der Regel höhere CO₂- und H₂O-Partialdrücke vorliegen, können beide Reaktionen einen beträchtlichen Einfluss auf den Gesamtprozess ausüben. Insbesondere in O₂-armen Gebieten können folglich sowohl CO₂ als auch H₂O – speziell im Fall von feuchter Rauchgasrezirkulation – als zusätzliche Oxidationsmittel auftreten und zum Koksabbrand beitragen. Die entsprechenden Reaktionen sind daher unter Oxyfuel-Bedingungen unbedingt mit zu berücksichtigen.

Die Koksabbrand-Reaktionen (1)-(5) werden anhand von Arrhenius-Ansätzen modelliert. Die entsprechenden Kinetik-Parameter (pre-exponentieller Faktor: $A_{0,i}$ bzw. Aktivierungstemperatur: $E_{a,i}/R$) der hier verwendeten Reaktionen sind unter Angabe der jeweiligen Literaturquellen in Tabelle 2 zusammengestellt.

Reaktion	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
A _{o,i}	4,35	4,9	45	1216	3850
	[kg/(m² s bar)]	[kg/(m² s bar)]	[kg/(m² s)]	[kg/(m² s)]	[kg/(m² s)]
E _{a,i} /R	3775	7265	12079	25980	26943
	[K]	[K]	[K]	[K]	[K]
Quelle	[19, 20, 21]	[25, 22]	[19, 20, 21]	[27, 23]	[27, 23]

Tabelle 2: Kinetik-Parameter der Koksabbrand-Reaktionen

Modellvalidierung: Die implementierten Modelle wurden anhand je eines Oxyfuel-Falls im ungestuften und im gestuften Betrieb mit Klein Kopje Steinkohle evaluiert. Das am Brenner zugeführte Gasgemisch setzt sich dabei jeweils aus 27 Vol.-% O₂ und 73 Vol.-% CO₂ zusammen. Das Stufungsgas besteht aus reinem Sauerstoff. Der globale Sauerstoffüberschuss entspricht jeweils $\lambda = 1,15$, wobei im gestuften Fall der lokale Sauerstoffüberschuss am Brenner mit $\lambda_{Br} = 0,75$ anzugeben ist.

Abbildung 8 zeigt einen Vergleich auf der Reaktorachse vom Brenner (z = 0 m) bis zum Reaktorauslass (z = 2,5 m) zwischen den Simulationsergebnissen (Linien) und den entsprechenden experimentellen Daten (Symbole). Die schwarzen Linien stehen für eine Simulation mit vereinfachten Modellen bzgl. der Koksumwandlung ("Default"); die in Rot dargestellte Simulation wurde mit den oben erläuterten Modellerweiterungen durchgeführt ("Advanced"). Offensichtlich sind beide Simulationsergebnisse nahezu identisch und die Erweiterungen haben unter den hier vorliegenden Verbrennungsbedingungen nur sehr geringen Einfluss.





Abbildung 8: Vergleich Simulation/Messung auf Reaktorachse (ohne Stufung)

Der versetzte Sauerstoffverbrauch zwischen Rechnung und Experiment zeigt, dass in den Simulationen eine verzögerte Zündung gegenüber den Messwerten vorhergesagt wird. Diese Abweichung kann zum einen damit erklärt werden, dass die Messungen während der Versuche mit einem (im Vergleich zum Reaktordurchmesser) relativ großen Absaugpyrometer durchgeführt werden, was zu einer Beeinträchtigung der Flamme führt. Dieser Effekt kann nicht in der Simulation abgebildet werden. Zum anderen können bereits kleine Abweichungen bzgl. der Einlassrandbedingungen zwischen Experiment und Modell speziell im Labormaßstab die Vorhersagegenauigkeit negativ beeinflussen. Nach einem Abstand von etwa 50 cm vom Brenner stimmen sowohl die vorhergesagte globale Tendenz als auch die absoluten Werte sehr gut mit den Messungen überein und bestätigen somit die Anwendbarkeit der Teilmodelle zur Simulation der Kohlenstaubverbrennung unter Oxyfuel-Bedingungen.

Die Gegenüberstellung von Simulation und Experiment des gestuften Falls ist in Abbildung 9 dargestellt. Die Zugabe des Stufungsgases erfolgt bei einem Abstand von 2 m vom Brenner senkrecht zur Hauptströmungsrichtung und bewirkt eine weitere intensive Reaktionszone. Dort wird schließlich durch die Zugabe des Sauerstoffs auch das gebildete CO vollständig zu CO₂ konvertiert. Auch im gestuften Fall ist eine gewisse Verzögerung der Zündung in den Simulationen sichtbar. Der Verlauf der CO₂-Konzentration im Brennernahbereich weist jedoch gegenüber dem ungestuften Fall eine bessere Übereinstimmung bzgl. des Zündzeitpunktes auf. Dies kann durch die vorliegenden Strömungsverhältnisse am Brennereintritt begünstigt werden, da im gestuften Fall niedrigere Einlassgeschwindigkeiten vorliegen.

Außerdem werden im gestuften Fall wesentliche Unterschiede zwischen den beiden Simulationen deutlich. Während die Simulation mit den Standard-Modellen den Anstieg der CO-Konzentration und die parallele Reduktion der CO₂-Werte im Bereich der unterstöchiometrischen Zone nicht wiedergeben kann, ist die Übereinstimmung der Simulation mit



den erweiterten Modellen sehr gut. Sowohl die Tendenz bzgl. der CO-Konzentrationen wird korrekt vorhergesagt als auch die einzelnen CO₂-Werte werden sehr gut berechnet.

Folglich können damit die im Projekt durchgeführten Modellerweiterungen bestätigt und verifiziert werden. Vor allem das Modell zur Koksoxidation und die integrierten Vergasungsreaktionen tragen erheblich dazu bei, dass die Genauigkeit des AIOLOS CFD-Codes unter Oxyfuel-Bedingungen deutlich verbessert werden konnte.



Abbildung 9: Vergleich Simulation/Messung auf Reaktorachse (mit Stufung)

Zusammenfassung: Hinsichtlich der theoretischen Betrachtung mit Hilfe numerischer Simulation lässt sich folgern, dass die Anwendung der neu implementierten Modelle eine sehr gute Übereinstimmung im Vergleich der Simulationsergebnisse mit experimentell ermittelten Daten gewährleistet. Besonders die Integration der physikalisch fundierten Mechanismen bzgl. des Koksabbrands stellt den CFD-Code auf eine allgemeingültigere Basis, was die Vorhersagegenauigkeit vor allem bei der Verbrennung unter Oxyfuel-Bedingungen erhöht. Damit wurde speziell im unterstöchiometrischen Bereich bei gestufter Betriebsweise eine wesentliche Verbesserung der Simulationsergebnisse erreicht. Diese Modellerweiterungen stellen somit in Kombination mit den weiteren Anpassungen des CFD-Codes AIOLOS ein sehr nützliches Werkzeug zur Verfügung, das die komplexe Berechnung der Verbrennung von Kohlenstaub in Luftatmosphäre und unter Oxyfuel-Bedingungen ermöglicht.

5.3 Ausblick

Mit den erzielten Ergebnissen lassen sich nun einige Schlussfolgerungen hinsichtlich der Überführung der Oxyfuel-Technologie in den Großmaßstab ziehen. Dabei ist anzunehmen, dass die im Labormaßstab erzielten Ergebnisse und Erfahrungen generell übertragbar auf den Betrieb in Großanlagen sind.



Grundsätzlich bietet demnach der gestufte Betrieb unter Oxyfuel-Bedingungen ein ähnliches Potential zur Reduktion der NO_x-Emissionen wie unter konventionellen Verbrennungsbedingungen. Alternativ zur Stufung mit einem Gemisch aus Sauerstoff und rezirkuliertem Rauchgas besteht auch die Möglichkeit der Stufung mit reinem Sauerstoff. Für die Auslegung eines Oxyfuel-Kraftwerks muss dabei berücksichtigt werden, dass sich damit auch der entsprechend erforderliche Massenstrom wesentlich reduziert. Das Design und Layout der Stufungsluft-Zufuhr muss im Kraftwerk entsprechend angepasst werden, um eine ausreichende Verteilung der Stufungsluft über den Brennkammerquerschnitt und das erforderliche Mischungsverhalten gewährleisten zu können.

Die Anwendbarkeit der Stufung mit reinem Sauerstoff innerhalb zukünftiger Oxyfuel-Kraftwerke erfordert weiterhin eine spezifische strömungsmechanische Optimierung der entsprechenden Komponenten. Hierbei hat sich gezeigt, dass die simulationsgestützte Auslegung anhand von CFD-Berechnungen auch unter Oxyfuel-Bedingungen machbar ist und zugehörige Parameterstudien damit kosteneffizient durchgeführt werden können. Um die Möglichkeiten der simulationsgestützten Auslegung und Optimierung stetig zu erweitern, sollen in künftigen Forschungsarbeiten nun insbesondere Modelle zur Schadstoffentstehung entwickelt werden, die unter Oxyfuel-Verbrennungsbedingungen angewendet werden können.

6 Wesentliche terminliche und inhaltliche Abweichungen zum Projektantrag

Das Projekt konnte im Wesentlichen wie im Terminplan vorgesehen durchgeführt werden.

7 Publikationen und Patente

7.1 Im Rahmen des Projektes entstandene Publikationen

7.1.1 Begutachtete Publikationen

- [1] Kather, A.; Scheffknecht, G.: The oxycoal process with cryogenic oxygen supply. Naturwissenschaften (2009), Vol. 96, S. 993-1010
- [2] Scheffknecht, G.; Maier, J.; Stein-Brzozowska, G.: Der Oxy-Fuel-Prozess: Derzeitiger Stand unter spezieller Berücksichtigung des Werkstoffverhaltens. VDI-Berichte Nr. 2102 (2010); VDI Düsseldorf; ISBN: 978-3-18-092102-0
- [3] Müller, M.; Schnell, U.; Grathwohl, S.; Maier, J.; Scheffknecht, G.: Evaluation of oxy-coal combustion modelling at semi-industrial scale. Energy Procedia (2012), Vol. 23, S. 197-206

7.1.2 Nicht-begutachtete Publikationen

 [4] Grathwohl, S.; Lemp, O.; Maier, J.; Schnell, U.; Scheffknecht, G.: Ein Brennerkonzept zum Einsatz unter Oxyfuel-Bedingungen. Tagungsband: 24. Deutscher Flammentag, 16. - 17.09.2009, Bochum



- [5] Grathwohl, S.; Lemp, O.; Schnell, U.; Maier, J.; Scheffknecht, G.; Kluger, F.; Krohmer, B.; Mönckert, P.; Stamatelopoulos, G.N.: Highly Flexible Burner Concept for Oxyfuel Combustion. 1st Oxyfuel Combustion Conference (2009), Cottbus
- [6] Müller, M.; Lemp, O.; Leiser, S.; Schnell, U.; Grathwohl, S.; Maier, J.; Scheffknecht, G.; Kluger, F.: Advanced Modeling of Pulverized Coal Combustion under Oxy-fuel Conditions. Tagung: 35th International Technical Conference on Clean Coal & Fuel Systems, June 6 to 10, 2010, Clearwater, Florida, USA; Veröffentlichung auf CD-ROM
- [7] Grathwohl, S.; Lemp, O.; Müller, M.; Schnell, U.; Maier, J.; Scheffknecht, G.; Kluger, F.; Krohmer, B.; Mönckert, P.: Oxy-Combustion of Coal – Needs, Opportunities, and Challenges. 10th AIChE Annual Meeting (2010), Salt Lake City, USA

7.2 Gemeinsame Publikationen zweier oder mehrerer KW21 Teilprojekte

Es wurden keine gemeinsamen Publikationen mehrerer Teilprojekte veröffentlicht.

7.3 Weitere Publikationen

- [8] Singh, D.; Croiset, E.; Douglas, P.L.; Douglas, M.A.: Techno-economic study of CO2 capture from an existing coal-fired power plant: MEA scrubbing vs. O2/CO2 recycle combustion. Energy Conversion and Management (2003), Vol. 44, S. 3073-3091
- [9] Wall, T.F.: Combustion processes for carbon capture. Proceedings of the Combustion Institute (2007), Vol. 31, S. 31-47
- [10] Wall, T.F.; Yu, J.: Coal-fired Oxyfuel Technology Status and Progress to Deployment. Tagung: 34th International Technical Conference on Clean Coal & Fuel Systems, May 31 to June 4, 2009, Clearwater, Florida, USA; Veröffentlichung auf CD-ROM
- [11] IEA: IEA Greenhouse Gas R&D Programme, www.ieaghg.org
- [12] Buhre, B.J.P.; Elliott, L.K.; Sheng, C.D.; Gupta, R.P.; Wall, T.F.: Oxy-fuel combustion technology for coal-fired power generation. Progress in Energy and Combustion Science (2005), Vol. 31, S. 283-307
- [13] Wall, T.; Liu, Y.; Spero, C.; Elliott, L.; Khare, S.; Rathnam, R.; Zeenathal, F.; Moghtaderi, B.; Buhre, B.; Sheng, C.; Gupta, R.; Yamada, T.; Makino, K.; Yu, J.: An overview on oxyfuel coal combustion – State of the art research and technology development. Chemical Engineering Research and Design (2009), Vol. 87, S. 1003-1016
- [14] Toftegaard, M.B.; Brix, J.; Jensen, P.A.; Glarborg, P.; Jensen, D.A.: Oxy-fuel combustion of solid fuels. Progress in Energy and Combustion Science (2010), Vol. 36, S. 581-625



- [15] Mitsui Babcock: Clean Coal Technology and Energy Review. (2007) http://www. doosanbabcock.com/energyreview/clean%20coal%20energy%%20review.pdf
- [16] Tan, R; Corragio, G.; and Santos, S.: Oxy-Coal Combustion with Flue Gas Recycle for the Power Generation Industry – A literature Review. IFRF Report (2005), G23/y/1
- [17] Ko, G.H.; Sanchez, D.M.; Peters, W.A.; Howard, J.B.: Correlations for effects of coal type and pressure on tar yields from rapid pyrolysis. 22nd Symposium on Combustion (1988), S. 115-124
- [18] Hurt, R.H.; Calo, J.M.: Semi-global intrinsic kinetics for char combustion modeling. Combustion and Flame (2001), Vol. 125, S. 1138-1149
- [19] Essenhigh, R.H.: Rate equations for the carbon-oxygen reaction with internal reaction. Energy & Fuels (1991), Vol. 5, S. 41-46
- [20] Essenhigh, R.H.; Mescher, A.M.: Influence of pressure on the combustion rate of carbon. 26th Symposium on Combustion (1996), S. 3085-3094
- [21] Klimesh, H.E.; Essenhigh, R.H.: Non-dissociative and dissociative adsorption of oxygen on carbon. 27th Symposium on Combustion (1998), S. 2941-2948
- [22] Niksa., S.; Liu, G.S.; Hurt, R.H.: Coal conversion submodels for design applications at elevated pressures. Part I: devolatilization and char oxidation. Progress in Energy and Combustion Science (2003), Vol. 29, S. 425-477
- [23] Roberts, D.G.; Harris, D.J.: Char gasification with O2, CO2, and H2O: effects of pressure on intrinsic reaction kinetics. Energy & Fuels (2000), Vol. 14, S. 483-489

7.4 Im Rahmen des Projektes entstandene Patente

Patente sind im Rahmen dieses KW21-Teilprojektes nicht entstanden.

8 Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses

8.1 Studentische Mitarbeiter

K. Taheri Unterstützung beim Aufbau der Versuchseinrichtung und Messungen.
 M. Bach Unterstützung beim Aufbau der Versuchseinrichtung und Messungen.

8.2 Studien-, Semester- und Bachelorarbeiten

M. Bach Entwicklung einer Kamerasonde zur Überwachung und Charakterisierung von Flammen.

8.3 Diplom- und Masterarbeiten

Diplom- und Masterarbeiten sind im Rahmen dieses KW21-Teilprojektes nicht entstanden.



8.4 Promotionen

Al-Makhadmeh, Leema: Coal Pyrolysis and Char Combustion under Oxy-Fuel Conditions. Dissertation Universität Stuttgart (2009)						
Anany, M.N.:	Numerical Modelling of Combustion Processes at Elevated Pressures. Dissertation Universität Stuttgart (2010)					
Dhungel, Bhupesh:	Experimental Investigations on Combustion and Emission Behaviour During Oxy-Coal Combustion. Dissertation Univ. Stuttgart (2010)					
Leiser, S.:	Numerical Simulation of Oxy-Fuel Combustion. Dissertation Universität Stuttgart (2010)					

9 Forschungsprogramme des Bundes und der EU

9.1 Angaben, ob weitere Drittmittel zum Projektthema eingeworben wurden, insbesondere aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen des Bundes und der EU

- COORETEC: Verbundprojekt "Korrosion und Verschlackung in Hochtemperaturkraftwerken mit neuen Werkstoffen"
- ADECOS: ADECOS-ZWSF-Projekt

EU:

Beteiligung an diversen Projekten des 6. und 7. Rahmenprogramms, teilweise als Koordinator, u.a. an folgenden früheren und laufenden Projekten:

"OxyBurner" (Development of Advanced Large Scale Low $\rm NO_x$ Oxy-Fuel Burner for PF Combustion)

"OxyMod" (Development and Experimental validation of a Mathematical Modelling Methodology for Oxy-Fuel Combustion for CO_2 Capture)

"ENCAP" (Enhanced Capture of CO₂)

"OxyCorr" (Boiler Corrosion under Oxy-fuel Conditions)

"DEBCO" (Demonstration of Large Scale Biomass Co-Firing and Supply Chain Integration)

"RECOMBIO" (Recovered Fuels combined with Biomass)

"DENOPT" (Optimisation of SCR-DeNO_x Catalyst Performance related to Deactivation and Mercury Oxidation)

"RECOFUEL" (Solid Recovered Fuels)

9.2 Geplante Antragsstellung bzw. künftige Förderung aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen

EU:

"Relcom" (Reliable and efficient combustion of Oxygen/Coal/ Recycles flue gas mixtures)



Arbeitskreis Kraftwerkssysteme und Dampferzeuger

Projekt: BW W 27DE

Halbtechnische Untersuchungen von innovativen Brennertechnologien und Feuerungskonzepten für den Einsatz in steinkohlebefeuerten Oxyfuel-Kraftwerken

Projektleiter:	Prof. Dr. techn. Günter Scheffknecht				
	Prof. DrIng. Uwe Schnell				
	DiplIng. Jörg Maier				
	Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) Universität Stuttgart				
Mitarbeiter:	DiplIng. (FH) Simon Grathwohl				
	DiplIng. Michael Muller				
Finanzierung:	Alstom Power Systems, 70329 Stuttgart				
	EnBW Kraftwerke AG, 70567 Stuttgart				
	E.on AG, 80333 München				

1 Ausgangssituation

Eine Vielzahl von Forschungsarbeiten beschäftigt sich mit der CO₂-Reduktion bei fossil befeuerten Kraftwerken. Die hauptsächlichen Forschungsschwerpunkte liegen dabei auf der Erhöhung der Anlageneffizienz, der Pre-Combustion-Capture, der Post-Combustion-Capture und der Oxyfuel-Verbrennung (sog. Carbon-Dioxide-Capture & Storage- bzw. CCS-Verfahren). Ein vereinfachtes Schema des Oxyfuel-Prozesses in Verbindung mit einem kohlegefeuerten Dampferzeuger ist in Abbildung 1 dargestellt.





Abbildung 1: Vereinfachtes Schema des Oxyfuel-Prozesses im Kraftwerk

Die Grafik zeigt die aufeinanderfolgenden Stufen des Gesamtprozesses: Luftzerlegung, Kohleverbrennung mit Rauchgasrezirkulation, Abgasaufbereitung und CO₂-Abtrennung bzw. -Speicherung. Mit den zusätzlich erforderlichen Prozessschritten geht eine Erhöhung der Eigenbedarfsleistung des Kraftwerks um ca. 7-11 % im Vergleich zum konventionellen, kohlegefeuerten Dampferzeuger einher [1]. Dennoch wird der Oxyfuel-Prozess als vergleichsweise kosteneffizientes CCS-Verfahren betrachtet [2, 3]. Ein weiterer Vorteil der Oxyfuel-Verbrennung besteht darin, dass bestehende fossil befeuerte Kraftwerke mit Hilfe mehr oder weniger aufwändiger Modifikationen für den Oxyfuel-Prozess umgerüstet werden können.

Weltweit laufen derzeit vielfältige Forschungsarbeiten im Bereich der Oxyfuel-Verbrennung mit dem Ziel der großtechnischen Umsetzung des Prozesses. Einen guten Überblick über die internationalen Forschungsaktivitäten im Bereich des Oxyfuel-Prozesses findet sich auf der IEA-Website des IEA Greenhouse Gas R&D Programme [4]. Weitere Ein- und Überblicke in laufende Forschungsaktivitäten geben Buhre [5], Wall [6] und Toftegaard [7]. Ein Großteil der diskutierten und untersuchten Konzepte zielt dabei auf eine Anpassung der Oxyfuel-Prozesse an die heutige Dampferzeuger- und Kraftwerkstechnik [8, 9] ab.

Während der Oxyfuel-Verbrennung wird die Kohle mit einer Mischung aus reinem Sauerstoff und rezirkuliertem Rauchgas verbrannt. Das rezirkulierte Rauchgas ist notwendig, um eine ähnliche Volumenstrom- und Temperaturverteilung zu erzielen, wie sie bei der Auslegung heutiger konventioneller Kohlekraftwerke erreicht wird. Vor diesem Hintergrund besteht das Rauchgas hauptsächlich aus CO₂ und Wasserdampf sowie in geringen Anteilen aus O₂, Ar, N₂, NO_x, SO_x und weiteren gasförmigen und partikulären Bestandteilen aus dem Brennstoff.

Durch die Kondensation des Wasserdampfs wird nahezu reines CO_2 produziert. Dieses kann verflüssigt und zu seiner Endlagerung transportiert werden. CO_2 -Konzentrationen von 95 Vol.-% (trocken) und höher können erreicht werden. Hierzu ist es aber notwendig, Sauerstoff mit geringen Anteilen von Verunreinigungen einzusetzen sowie sicherzustellen, dass Umgebungsluft nicht in die Anlage eindringen kann.



Ein weiterer Vorteil des Oxyfuel-Prozesses, neben der CO₂-Abscheidung, ist die Reduktion des emittierten Rauchgasvolumenstroms. Die Kosten reduzieren sich somit für die mit diesem Volumenstrom beaufschlagten Rauchgasreinigungskomponenten.

Für die Untersuchung des Oxyfuel-Prozesses im halbtechnischen Maßstab wurde eine 500 kW_{th} Staubfeuerung für den Oxyfuel-Betrieb umgerüstet. Damit wurden bereits mehrere hundert Stunden Versuchsbetrieb mit unterschiedlichen Forschungsschwerpunkten durchgeführt. Im Rahmen dieser Forschungsarbeiten konnten zahlreiche Betriebserfahrungen unter Oxyfuel-Bedingungen gewonnen werden.



Abbildung 2: Halbtechnische 500 kWth Oxyfuel-Kohlestaubverbrennungsanlage

Im Zuge der Forschungsarbeiten im Bereich der Oxyfuel-Verbrennung wurde am IFK ein neuer Brenner gebaut, der eine hohe Flexibilität in der Verbrennungsgaszufuhr bietet und dadurch ein großes Untersuchungspotential aufweist. Somit stehen zwei grundsätzlich unterschiedliche Brennerkonzepte zur Verfügung. Mit einem der Brennerkonzepte ist es möglich, Sauerstoff direkt über den Brenner der Verbrennung zuzuführen (Umluft 3 in Abb. 3).



Abbildung 3: Zwei unterschiedliche Brennerdesigns



Das am IFK vorhandene Wissen, die Erfahrungen und die Anlagentechnik bieten somit eine ideale Basis, um die vielversprechende Oxyfuel-Verbrennung feuerungsseitig gezielt zu untersuchen.

Neben den experimentellen Versuchsanlagen wird in der Abteilung "Feuerungs- und Dampferzeugersimulation" des IFK seit vielen Jahren die Modellierung und Simulation von Verbrennungsvorgängen durchgeführt. Hierfür steht das Verbrennungssimulationsprogramm AIOLOS zur Verfügung, welches im Zuge weiterer Forschungsarbeiten bereits im Bereich der Oxyfuel-Verbrennung weiterentwickelt wurde.

2 Projektziele

Ziel des Projektteils BW W 27DE ist es, die Forschungsarbeiten im Bereich der Oxyfuel-Verbrennung weiter voranzutreiben und zu optimieren. Frühere und laufende Forschungsarbeiten konzentrieren sich überwiegend auf die Schadstoffbildung und das Abbrandverhalten bei Einsatz von Braunkohle aus dem Lausitzer Revier. In diesem Projekt liegt der Schwerpunkt auf der Nutzung von Steinkohle als Brennstoff.

Die bisher üblichen Konzepte von Oxyfuel-Prozessen sehen für die Verbrennung hohe Mengen an extern rezirkuliertem Rauchgas vor, um die Flammentemperaturen auf ähnliche Werte wie bei der Luftverbrennung abzusenken. Im Mittelpunkt der Untersuchungen stehen insbesondere Brenner- und Feuerungskonzepte, bei denen die bestehenden positiven Erkenntnisse der Luft- und Brennstoffstufung unter Oxyfuel-Bedingungen konsequent angewendet und weiterentwickelt werden. Eine stabile Zündung, eine kontrollierte Wärmefreisetzung, eine geringe Schadstoffbildung sowie die Gewährleistung eines vollständigen Brennstoffumsatzes sind hierbei wesentliche Randbedingungen für den Erfolg eines Konzepts.

Grundlegende experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Entwicklung von innovativen Brennertechnologien und Feuerungskonzepten wurden an einem elektrisch beheizten 20 kW_{th} Flugstromreaktor durchgeführt (BWL27 DE). Weiter werden CFD-Modelle weiterentwickelt, um die Verbrennung von Steinkohle unter Oxyfuel-Bedingungen wiedergeben zu können. Daraufhin werden ausgewählte Versuche an der im experimentellen Teil verwendeten Testanlage zur Validierung der CFD-Modelle herangezogen und die hierbei erfassten Messdaten den Simulationsergebnissen gegenübergestellt.

2.1 Umsetzung der Hinweise aus den bisherigen Begutachtungen

Es mussten keine wesentlichen Anpassungen vorgenommen werden.

3 Vernetzung

3.1 Vernetzung innerhalb KW21

Die bereits in der ersten KW21-Phase intensivierte Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Energiesysteme (LES) der TU München wurde im Rahmen der Oxyfuel-Projekte der zweiten KW21-Phase fortgesetzt. Die bestehenden persönlichen Kontakte zwischen den Antragstellern und Mitarbeitern der Institute erleichterten die Zusammenarbeit und Verknüpfung der Einzelvorhaben. Im Zuge dieser Kooperation zwischen IFK und LES



(KW21-Projekt "Kontrolliert gestufte Oxycoal-Verbrennung") sollte somit ein innovatives und im halbtechnischen Maßstab erprobtes Brenner- und Feuerungskonzept für den Oxyfuel-Prozess erarbeitet werden.

3.2 Vernetzung außerhalb KW21

Das IFK beschäftigt sich seit mehreren Jahren mit der Oxyfuel-Verbrennung und war dabei in mehreren europäischen Forschungsprojekten (ENCAP, Oxyburner, Oxymod) involviert.

4 Vorgehensweise und Methodik

Die experimentellen Versuche bezüglich verschiedener Brennerkonzepte wurden im halbtechnischen Maßstab an der 500kW_{th} Kohlestaubverbrennungsanlage (KSVA) des IFK durchgeführt. Um die verschiedenen Einstellungen und Brennerkonzepte bewerten zu können, wurden bei den Versuchen verschiedenste Parameter wie Temperatur, O₂, CO₂, CO, NO, NO_x und SO₂ am Brennkammerende kontinuierlich, sowie in der Flamme auf den Ebenen 2 bis 16 rasterförmig in unterschiedlicher Auflösung als Profile erfasst. Die grundsätzliche Vorgehensweise bei den Untersuchungen war:

- Optimierung der Anlage und Peripherie
- Als Referenzfall wurde zu jeder Oxyfuel-Einstellung eine vergleichbare Lufteinstellung angefahren und dokumentiert
- Versuche ausgehend vom "Standard-Kohlestaubbrenner" als Referenz bis hin zur Sauerstoffdirekteindüsung mit innovativem Brennerkonzept

Schwerpunkte der Untersuchungen waren:

- Absenkung des Restsauerstoffs im Abgas
- Schadstoffmessungen in der Flamme und am Brennkammerende
- Zündverhalten

Insgesamt wurden in vier Versuchswochen im Dreischichtbetrieb drei verschiedene Brennerkonzepte im Luft- und Oxyfuel-Modus getestet und diverse Messungen durchgeführt. Einen Überblick über die getesteten Brennerkonzepte gibt Abbildung 4. Beim Konzept 1 handelt es sich um den IFK-Standardbrenner. Das Konzept 2 geht aus dem Standardbrenner hervor, der jedoch für Luft und Oxyfuel speziell optimiert wurde. Das Brennerkonzept 3 wurde vom IFK nach einem Alstom-Design nachkonstruiert und gefertigt.







5 Projektergebnisse und Ausblick

5.1 Halbtechnische Erprobung und Optimierung neuer Brennerund Feuerungskonzepte (Arbeitspaket I)

5.1.1 Versuchsreihe Brennerkonzept 1

Die Versuche in der ersten Phase des Projektes wurden mit dem Standardbrenner (Konzept 1) und einer polnischen Steinkohle durchgeführt. Der Brenner hat einen variablen Drallerzeuger (movable Block) der im unteren Bereich der Windbox angeordnet ist. Der Brennerauslass ist hingegen sehr einfach über zwei konzentrische Ringspalte realisiert; der innere leitet die Primärluft, die gleichzeitig als Traggas für den Brennstoff dient. Im äußeren Ringspalt wird die verdrallte Sekundärluft in den Brennraum geführt (Abb. 5).



Abbildung 5: IFK Brennerkonzept 1 mit "movable" Block zur Dralleinstellung

Alle Einstellungen konnten problemlos im Hinblick auf eine gute Flammenstabilität betrieben werden. Eine O_2 -Absenkung unter 3 Vol.-% am Brennkammerende führte zu einem deutlichen Anstieg der CO-Konzentrationen. Weiter reagierten Betriebsweisen mit hohen Rezirkulationsraten (bis 21 Vol.% O_2 im Verbrennungsgas) sensitiver bezüglich CO und Ausbrand. Gründe hierfür sind sehr wahrscheinlich im Wärmehaushalt sowie den mit der Rezirkulationsrate in direktem Zusammenhang stehenden Sauerstoffkonzentrationen im Oxidator zu suchen. Einen nicht unwesentlichen Beitrag spielen hier auch die veränderten aerodynamischen Verhältnisse am Brenner durch veränderte Volumenströme.

Weiterhin wurden in dieser Versuchsreihe neue Komponenten, wie z.B. eine neu konstruierte Brennraumabdeckung, sowie neu entwickelte und verbesserte Sonden eingesetzt und damit für den weiteren Projektverlauf erfolgreich getestet.

5.1.2 Versuchsreihe Brennerkonzept 1 / 2

In der zweiten Versuchsreihe wurden in zwei Versuchswochen Flammenmessungen am Standardbrenner (wie Versuchsreihe 1) sowie an einer optimierten Version des Standardbrenners durchgeführt (2. Brennerkonzept). Über konstruktive Maßnahmen wurde hierbei dieser Brenner für Luft- und Oxyfuel-Bedingungen optimiert. Hierfür wurden für beide Betriebsmodi die Ringspalte und Drall-Winkel so angepasst, dass sie gleiche bzw. ähnliche Impulsverhältnisse (Luft und Oxyfuel) aufweisen (Abbildung 6). Im Wesentlichen bedeutete dies, dass für den Oxyfuel-Fall die Querschnitte kleiner zu dimensionieren waren. Weiter ist das Design so angepasst worden, dass sich nun die Drallerzeuger direkt am Brennerausgang befinden. Die Sauerstoffkonzentration im Sekundäroxidant wurde mit 32 bis 34 Vol.-% so gewählt, dass in etwa die gleiche adiabate Flammentemperatur wie im Luft-Fall erreicht wird.



Abbildung 6: Brennerkonzept 2 mit Optimierung für Luft- (li.) und Oxyfuelverbrennung (re.)



Abbildung 7: Kamerabilder zum Vergleich der Zündung und Flammenstabilität (Ebene 2): links Standardbrenner (Brennerkonzept 1), rechts optimierter Standardbrenner (Brennerkonzept 2)

Das Zündverhalten konnte im Oxyfuel-Fall anhand des 2. Brennerkonzepts durch die konstruktiven Maßnahmen deutlich verbessert werden. Einerseits zündet die Flamme im Oxyfuel-Betrieb deutlich früher (Abbildung 7); andererseits zeigen sich insgesamt bessere Verbrennungsergebnisse, was durch eine bessere Ausbrandqualität der Ascheproben bestätigt wurde. Bezüglich Sauerstoffabsenkung sind mit dem optimierten 2. Brennerkonzept ebenfalls niedrigere Restsauerstoffgehalte möglich. Restsauerstoffgehalte unter 3 Vol.-% führten in diesem Fall kaum zu einer Erhöhung der CO-Emissionen. Umgekehrt waren jedoch die NO-Emissionen im Fall des optimierten Brennerkonzepts deutlich höher. Dies ist auf die bessere Durchmischung auf Grund der veränderten Strömungsführung innerhalb der Brennkammer zurückzuführen.

5.1.3 KSVA Versuchsreihe mit flexiblem Brennerkonzept 3.0

In einer dritten Versuchsreihe wurde erstmals das 3. Brennerkonzept, welches auf einem Alstom-Design beruht, mit einer Steinkohle eingesetzt. Weiter wurde im Oxyfuelbetrieb der Sauerstoff nicht vorgemischt, sondern direkt über den Brenner eingedüst (siehe V1 in Abbildung 8). Im Fall der Sauerstoffdirekteindüsung über die Lanzen kann auf aufwändige O₂-Mischeinheiten in der Peripherie der Anlage verzichtet werden, was wiederum die Kosten für den Bau einer Anlage reduziert. Dieser am IFK neu konstruierte Brenner ist ebenso wie die anderen untersuchten Brennerkonzepte als Deckenbrenner ausgeführt. Er unter-



scheidet sich aber sonst deutlich vom Brennerkonzept 1 bzw. 2. Statt zwei konzentrischen Ringspalten für die Oxidantien hat dieser vier, sowie acht Lanzen zur Zuführung von Sauerstoff. Die Lanzen sind ringförmig um den Primärluftstrom angeordnet. Der Brenner wurde aus hochwarmfesten Stahl der Güte 1.4864 gefertigt, um mögliche Temperaturspitzen auszuhalten sowie möglichst wenig Reaktionspotential bezüglich erhöhten Sauerstoffkonzentrationen aufzuweisen.



Abbildung 8: 3. Brennerkonzept (beruhend auf einem Alstom-Design)

Das Zündverhalten dieser dritten Versuchsreihe mit Direkteindüsung von reinem Sauerstoff im Oxyfuel-Fall ist in Abbildung 9 ersichtlich. Die Zündung erfolgt sowohl im Luft- als auch im Oxyfuel-Fall sehr früh direkt an der Brennermündung.



Abbildung 9: Kamerabilder (2. Ebene) und gemessene Gastemperaturen; Brennerkonzept 3

Das dritte Brennerkonzept mit Sauerstoffdirekteindüsung wurde ebenfalls erstmals erfolgreich mit einer Steinkohle getestet. Die Möglichkeit der Vertrimmung der Oxidantien auf die einzelnen Brennerquerschnitte erweist sich als sehr großer Vorteil, da Drall- und Impulsverhältnisse im Oxyfuel-Betrieb angepasst werden können.

Es wurden sehr stabile Flammen mit Luft und Oxyfuel erreicht. Im Oxyfuel-Fall mit Direkteindüsung ist eine stabile Flamme aufgrund aerodynamischer Instabilität jedoch nur bei hohen Rezirkulationsraten möglich. Wie auch schon die Untersuchung der ersten Versuchsreihe gezeigt hat, führen diese hohen Rezirkulationsraten jedoch auch vermehrt zu CO-Peaks im Abgas. Weiter kann festgestellt werden, dass die Eindüsung von reinem Sauerstoff keinerlei Probleme oder kritische Versuchsparameter erzeugt hat. Weder gab es erhöhte Temperaturen noch kritische Sauerstoffkonzentrationen in der Brennkammer bzw. an der Brennkammerwand.



5.1.4 KSVA Versuchsreihe mit optimiertem Brennerkonzept 3.1

In der 4. Versuchsreihe wurde das 3. Brennerkonzept durch konstruktive Maßnahmen für die KSVA optimiert und in sechs verschiedenen Betriebszuständen getestet. Der modifizierte Brenner wird im Folgenden mit dem Index 3.1 gekennzeichnet. Die Umbaumaßnahmen konzentrierten sich auf den Brennerauslass. Der Drallwinkel wurde von 30° auf 45° erhöht sowie Abweisbleche von V3 verlängert und etwas mehr in den Brennraum gezogen. Dadurch soll dem Radialimpuls mehr Raum gegeben werden. Zusätzlich wurde das Brennerkonzept 3.1 unter gestuften Bedingungen getestet. Das Stufungsmedium im Luft-Fall war vorgewärmte Luft. In den gestuften Oxyfuel-Fällen wurde reiner Sauerstoff benutzt.

In Abbildung 10 sind die Kamerabilder der angefahrenen Betriebszustände in einer Übersicht dargestellt. In allen Einstellungen war ein stabiler Betrieb möglich. Im gestuften Luft-Fall sowie im gestuften, vorgemischten Oxyfuel-Fall ist im Vergleich zu den ungestuften Fällen eine leichte Verzögerung bei der Zündung erkennbar.



Abbildung 10: Bilder (Ebene 2) verschiedener Versuchseinstellungen, Brennerkonzept 3.1

Das dritte Brennerkonzept mit Sauerstoffdirekteindüsung konnte optimiert werden und auch unter gestuften Bedingungen getestet werden. In der ungestuften Fahrweise verbesserte sich die Flammenstabilität dahingehend enorm, dass nun auch Fälle mit O₂-Gesamtkonzentrationen größer 30% problemlos angefahren werden konnten. Selbst der Stufungsbetrieb mit einem Brennerlambda von 0,85 war problemlos möglich. Auch hier war von Vorteil, dass der Volumenstrom der Verbrennungsgase zwischen den Brennerquerschnitten V2 und V3 vertrimmt werden konnte.



Die CO-Konzentrationen in den Oxyfuel-Fällen lagen sowohl im ungestuften als auch gestuften Betrieb etwas über denen der vergleichbaren Luft-Fälle. Auf den Energiegehalt bezogen liegen die CO-Emissionen jedoch ungefähr auf vergleichbarem Niveau wie unter Luftbedingungen. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die sehr hohen NO_x-Konzentrationen, die im Oxyfuel-Fall mit Sauerstoffdirekteindüsung entstehen, durch Stufung auf ein Niveau gebracht werden können, das mit dem des gestuften Luft-Falls vergleichbar ist. Dies bedeutet, dass der gestufte Oxyfuel-Fall in spezifischen Emissionen (mg/MJ) gerechnet aufgrund des geringeren Rauchgasvolumenstroms dann sogar wesentlich besser abschneidet als der vergleichbare gestufte Luft-Fall.

5.2 Auswertung und Bewertung der experimentellen Ergebnisse (Arbeitspaket II)

Für die Bewertung der experimentellen Ergebnisse wurden die im Projekt BW L 27DE vorgenommenen Modellerweiterungen innerhalb des CFD-Codes AIOLOS herangezogen. Es wurde je ein Fall mit konventionellem Luft-Betrieb und ein Fall mit Oxyfuel-Betrieb gewählt. In den entsprechenden Experimenten wurde das Brennerkonzept 3 verwendet und als Brennstoff wurde eine hochflüchtige Steinkohle (Pittsburgh #8) verfeuert.

Die Simulationsergebnisse des Luft-Falls sind in Abbildung 11 anhand der Verteilungen von Gastemperatur und CO- bzw. O₂-Konzentrationen dargestellt. Dabei ist jeweils sowohl das gesamte Rechengebiet als auch die Nahansicht des Brenneraustritts zu sehen. Es zeigt sich, dass der über die Einlassströme aufgeprägte hohe axiale Impuls zunächst eine strahlförmige Ausbildung der Flamme bewirkt. Erst bei einem Abstand von etwa 60 cm vom Brenneraustritt weitet sich die Flamme zunehmend auf. Ferner wird deutlich, dass die Simulation bereits in der Brennermuffel hohe Temperaturen vorhersagt (etwa 1200 °C), die Spitzentemperaturen liegen weiter stromabwärts vor in einer relativ großen Zone von etwa 0,5 m bis 1,5 m. Ab etwa 1,8 m stromabwärts besteht schließlich eine homogene Temperaturverteilung.

Das O_2 -Profil zeigt, dass eine relativ schmale, bis etwa 1,2 m reichende Zone entsteht, in der Sauerstoffmangel herrscht. Im Vergleich mit dem CO-Profil wird klar, dass vor allem in dieser O_2 -armen Zone nennenswerte CO-Konzentrationen berechnet werden. CO-Spitzenwerte werden in dem Bereich vorhergesagt, in dem der am Brenner eintretende Sauerstoff intensiv mit dem Brennstoff reagiert.



Abbildung 11: Ergebnis der Simulation des Luft-Falls (Brennerkonzept 3)

Innovative Brennertechnologien und Feuerungskonzepte für Oxyfuel-Kraftwerke



In Abbildung 12 ist der Vergleich zwischen Simulation und Messung anhand des axialen Profils auf der Brennkammerachse dargestellt. Das Temperaturprofil der Experimente wird von den Simulationen richtig wiedergegeben. Die Tendenz wird richtig berechnet, allerdings stimmen die Werte in direkter Nähe zum Brenner nicht überein. Dies könnte zum einen auf eine verzögerte Zündung in der Simulation hinweisen. Wahrscheinlicher ist allerdings, dass die Abweichung darauf zurückzuführen ist, dass hier diskrete Punktwerte aus den Simulationsergebnissen mit Messwerten verglichen werden, die im Prinzip als Volumenwerte interpretiert werden müssen. Dies ist einerseits dadurch begründet, dass bereits minimale Abweichungen der Messposition unterschiedliche Ergebnisse liefern können. Andererseits werden die Messwerte generell mit Hilfe von Absaugpyrometern generiert, die folglich ein bestimmtes Volumen des Rauchgases abziehen und analysieren.



Abbildung 12: Axialer Vergleich Simulation/Messung auf Brennerachse im Luft-Fall

Der Vergleich der Gaskonzentrationen zeigt ebenfalls, dass die Tendenz von der Simulation richtig wiedergegeben wird. Auch hier ist jedoch die Abweichung von den Messwerten im Brennernahfeld sichtbar und der Spitzenwert der CO-Konzentration wird unterschätzt. Weiterhin ist die in der Simulation ausgeprägte O₂-arme Zone nicht in den Messwerten zu erkennen. Da diese Zone allerdings sehr schmal ist (siehe Abbildung 11), ist diese Abweichung ebenfalls auf den inhärenten Fehler im Vergleich zwischen Punkt- und Volumenwerten zurückzuführen.



Abbildung 13: Ergebnis der Simulation des Oxyfuel-Falls



Abbildung 13 zeigt die Simulationsergebnisse des Oxyfuel-Falls mit den Verteilungen von Gastemperatur und CO- bzw. O₂-Konzentrationen. Hier wird deutlich, dass sich ein zum Luft-Fall sehr unterschiedliches Flammenbild einstellt. Auch hier bestehen bereits in der Brennermuffel sehr hohe Temperaturen (> 1500 °C), die die Temperaturen des Luft-Falls noch übertreffen. Die Zone der Spitzentemperaturen ist hier näher am Brenner und wesentlich kürzer als im Luft-Fall. Als Maximalwert werden bis zu etwa 1750 °C vorhergesagt. Die Konzentrationsprofile zeigen, dass auch hier in der unterstöchiometrischen Zone unter O₂-Mangel die Höchstwerte an CO berechnet werden. Weiterhin ist die Direkteindüsung des Sauerstoffs in der Nahansicht des O₂-Profils anhand der roten Zone am Brenneraustritt sehr deutlich zu erkennen.

In Abbildung 14 ist der Vergleich zwischen Simulation und Messung anhand des axialen Profils auf der Brennkammerachse dargestellt. Analog zum Luft-Fall stimmt der Temperaturverlauf sehr gut mit dem Experiment überein. Gleiches gilt für die Gaskonzentrationen; die Tendenz wird auch hier richtig wiedergegeben. Außerdem liegt der berechnete Spitzenwert der CO-Konzentration in der gleichen Größenordnung wie der Messwert.



Abbildung 14: Axialer Vergleich Simulation/Messung auf Brennerachse im Oxyfuel-Fall

Im Vergleich zwischen Luft- und Oxyfuel-Fall wird deutlich, dass zum einen die bekannten und zu erwartenden Tendenzen wie höhere CO-Konzentrationen im Oxyfuel-Fall richtig wiedergegeben werden. Außerdem liegen in beiden Fällen sehr unterschiedliche Flammenformen vor, womit wesentliche Unterschiede bzgl. der Temperaturverteilung und der Ausbildung der unterstöchiometrischen Zone erklärt werden können. Diese Unterschiede sind in den vorliegenden Fällen jedoch weniger auf die Verbrennungsbedingungen – also Luft gegenüber Oxyfuel – als auf die spezifischen Strömungsverhältnisse zurückzuführen.

Abbildung 15 zeigt einen Vergleich der axialen Geschwindigkeiten der beiden Fälle im Bereich bis zu einem Abstand von etwa 1,8 m vom Brenneraustritt. Darin wird deutlich, dass durch die entsprechende Verteilung der Einlassströme am Brenner ein unterschiedliches Strömungsbild induziert wird. Wesentliche Unterschiede sind dabei verschieden ausgeprägte äußere Rezirkulationszonen im Bereich der Brennerwand. Diese Zone ist im Luft-Fall deutlich größer und reicht bis zu einem Abstand von etwa 1 m vom Brenner; im Oxyfuel-Fall nur bis etwa 0,5 m vom Brenner. Dagegen bildet sich im Oxyfuel-Fall eine zusätzliche Rezirkulationszone in der Mitte der Brennkammer aus. Die Strömungsverhältnisse führen dazu, dass im Luft-Fall eine wesentlich weitere Zone mit Spitzentemperaturen vorliegt als im Oxyfuel-Fall. Im Oxyfuel-Fall bewirkt die Rezirkulationszone in der Brennkammermitte eine lokale Begrenzung der Flammenzone und ein Verschieben stromaufwärts in Richtung des Brenners.





Abbildung 15: Vergleich der Strömungsverhältnisse zwischen Luft- (links) und Oxyfuel-Fall (rechts)

5.3 Erstellung eines Abschlussberichts (Arbeitspaket III)

Für die Projektpartner wurde ein ausführlicher Projektabschlussbericht im Umfang von 71 Seiten verfasst, in dem alle Projektergebnisse detailliert dargelegt werden. Nachfolgend werden die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst und ein Ausblick gegeben.

An der 500 kW_{th} Brennkammer wurden in mehreren Versuchswochen drei verschiedene Brennerkonzepte im Luft- und Oxyfuel-Modus getestet und diverse Messungen durchgeführt. Dabei wurde zu jedem Verbrennungsversuch unter Oxyfuel-Atmosphäre je eine vergleichbare Referenzflamme mit Luft vermessen und ausgewertet. Mit den erzielten Ergebnissen lassen sich einige Schlussfolgerungen hinsichtlich der Überführung der Oxyfuel-Technologie in den Großmaßstab ziehen. Dabei ist anzunehmen, dass die im technischen Maßstab erzielten Ergebnisse und Erfahrungen generell übertragbar auf den Betrieb in Großanlagen sind.

Grundsätzlich bietet demnach der gestufte Betrieb unter Oxyfuel-Bedingungen ein ähnliches Potential zur Reduktion der NO_x-Emissionen wie unter konventionellen Verbrennungsbedingungen. Alternativ zur Stufung mit einem Gemisch aus Sauerstoff und rezirkuliertem Rauchgas besteht auch die Möglichkeit der Stufung mit reinem Sauerstoff. Für die Auslegung eines Oxyfuel-Kraftwerks muss dabei berücksichtigt werden, dass sich damit auch der entsprechend erforderliche Massenstrom wesentlich reduziert. Das Design und Layout der Stufungsluft-Zufuhr muss im Kraftwerk entsprechend angepasst werden, um eine ausreichende Verteilung der Stufungsluft über den Brennkammerquerschnitt und das erforderliche Mischungsverhalten gewährleisten zu können.

Die Anwendbarkeit der Stufung mit reinem Sauerstoff innerhalb zukünftiger Oxyfuel-Kraftwerke erfordert weiterhin eine spezifische strömungsmechanische Optimierung der entsprechenden Komponenten. Hierbei hat sich gezeigt, dass die simulationsgestützte Auslegung anhand von CFD-Berechnungen auch unter Oxyfuel-Bedingungen machbar ist und zugehörige Parameterstudien damit kosteneffizient durchgeführt werden können. Um die Möglichkeiten der simulationsgestützten Auslegung und Optimierung stetig zu erweitern, sollen in künftigen CFD-Forschungsarbeiten nun insbesondere Modelle zur Schadstoffentstehung, sowohl bzgl. NO_x also auch SO_x, entwickelt werden, die unter Oxyfuel-Verbrennungsbedingungen angewendet werden können.



6 Wesentliche terminliche und inhaltliche Abweichungen zum Projektantrag

Es sind keine wesentlichen terminlichen sowie inhaltlichen Abweichungen zum Projektantrag eingetreten.

7 Publikationen und Patente

7.1 Im Rahmen des Projektes entstandene Publikationen

7.1.1 Begutachtete Publikationen

- [1] Kather, A.; Scheffknecht, G.: The oxycoal process with cryogenic oxygen supply. Naturwissenschaften (2009), Vol. 96, S. 993-1010
- [2] Müller, M.; Schnell, U.; Grathwohl, S.; Maier, J.; Scheffknecht, G.: Evaluation of oxy-coal combustion modelling at semi-industrial scale. Energy Procedia (2012), Vol. 23, S. 197-206

7.1.2 Nicht-begutachtete Publikationen

- [3] Grathwohl, S.; Lemp, O.; Maier, J.; Schnell, U.; Scheffknecht, G.: Ein Brennerkonzept zum Einsatz unter Oxyfuel-Bedingungen. Tagungsband: 24. Deutscher Flammentag, 16. - 17.09.2009, Bochum
- [4] Grathwohl, S.; Lemp, O.; Schnell, U.; Maier, J.; Scheffknecht, G.; Kluger, F.; Krohmer, B.; Mönckert, P.; Stamatelopoulos, G.N.: Highly Flexible Burner Concept for Oxyfuel Combustion. 1st Oxyfuel Combustion Conference (2009), Cottbus
- [5] Al-Makhadmeh, L.; Maier, J.; Scheffknecht, G.: Coal Pyrolysis and Char Burnout Under Conventional and Oxy-Fuel Conditions. Tagungsband: 24. Deutscher Flammentag, 16. - 17.09.2009, Bochum; S.: 295-300; ISBN: 978-3-18-092056-6
- [6] Stein-Brzozowska, G.; Miller, E.; Kull, R.; Maier, J.; Scheffknecht, G.: Vergleich der am IVD untersuchten Vorgehensweisen zur Bestimmung der Korrosionsmechanismen an ausgewählten Überhitzerwerkstoffen unter Oxyfuel-Bedingungen. Tagungsband: 41. Kraftwerkstechnisches Kolloquium - Sichere und nachhaltige Energieversorgung, Dresden, 13. und 14. Oktober 2009; S.: 393-401; ISBN: 978-3-935317-42-9
- [7] Maier, J.; Al-Makhadmeh, L.; Scheffknecht, G.: Formation and Impact of Gases Sulfur Components in an Oxyfuel Process. Tagung: AIChE Annual Meeting, 8th - 13th Nov., 2009, Nashville, TN; Veröffentlichung auf CD-ROM
- [8] Müller, M.; Lemp, O.; Leiser, S.; Schnell, U.; Grathwohl, S.; Maier, J.; Scheffknecht, G.; Kluger, F.: Advanced Modeling of Pulverized Coal Combustion under Oxy-fuel Conditions. Tagung: 35th International Technical Conference on Clean Coal & Fuel Systems, June 6 to 10, 2010, Clearwater, Florida, USA; Veröffentlichung auf CD-ROM



[9] Grathwohl, S.; Lemp, O.; Müller, M.; Schnell, U.; Maier, J.; Scheffknecht, G.; Kluger, F.; Krohmer, B.; Mönckert, P.: Oxy-Combustion of Coal – Needs, Opportunities, and Challenges. 10th AIChE Annual Meeting (2010), Salt Lake City, USA

7.2 Gemeinsame Publikationen zweier oder mehrerer KW21 Teilprojekte

Es sind keine gemeinsamen Publikationen entstanden.

7.3 Weitere Publikationen

- [10] Singh, D.; Croiset, E.; Douglas, P.L.; Douglas, M.A.: Techno-economic study of CO₂ capture from an existing coal-fired power plant: MEA scrubbing vs. O₂/CO₂ recycle combustion. Energy Conversion and Management (2003), Vol. 44, S. 3073-3091
- [11] Wall, T.F.: Combustion processes for carbon capture. Proceedings of the Combustion Institute (2007), Vol. 31, S. 31-47
- [12] Wall, T.F.; Yu, J.: Coal-fired Oxyfuel Technology Status and Progress to Deployment. Tagung: 34th International Technical Conference on Clean Coal & Fuel Systems, May 31 to June 4, 2009, Clearwater, Florida, USA; Veröffentlichung auf CD-ROM
- [13] IEA: IEA Greenhouse Gas R&D Programme, www.ieaghg.org
- [14] Buhre, B.J.P.; Elliott, L.K.; Sheng, C.D.; Gupta, R.P.; Wall, T.F.: Oxy-fuel combustion technology for coal-fired power generation. Progress in Energy and Combustion Science (2005), Vol. 31, S. 283-307
- [15] Wall, T.; Liu, Y.; Spero, C.; Elliott, L.; Khare, S.; Rathnam, R.; Zeenathal, F.; Moghtaderi, B.; Buhre, B.; Sheng, C.; Gupta, R.; Yamada, T.; Makino, K.; Yu, J.: An overview on oxyfuel coal combustion – State of the art research and technology development. Chemical Engineering Research and Design (2009), Vol. 87, S. 1003-1016
- [16] Toftegaard, M.B.; Brix, J.; Jensen, P.A.; Glarborg, P.; Jensen, D.A.: Oxy-fuel combustion of solid fuels. Progress in Energy and Combustion Science (2010), Vol. 36, S. 581-625
- [17] Mitsui Babcock: Clean Coal Technology and Energy Review. (2007) http://www. doosanbabcock.com/energyreview/clean%20coal%20energy%%20review.pdf
- [18] Tan, R; Corragio, G.; and Santos, S.: Oxy-Coal Combustion with Flue Gas Recycle for the Power Generation Industry – A literature Review. IFRF Report (2005), G23/y/1



7.4 Im Rahmen des Projektes entstandene Patente

Es sind im Rahmen dieses Teilprojektes keine Patente entstanden.

8 Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses

8.1 Studentische Mitarbeiter

- M. Bach Unterstützung beim Aufbau der Versuchseinrichtung und Messungen.
- K. Taheri Unterstützung beim Aufbau der Versuchseinrichtung und Messungen.

8.2 Studien-, Semester- und Bachelorarbeiten

M. Bach Entwicklung einer Kamerasonde zur Überwachung und Charakterisierung von Flammen.

8.3 Diplom- und Masterarbeiten

Diplom- und Masterarbeiten sind im Rahmen dieses KW21-Teilprojektes nicht entstanden.

8.4 Promotionen

- Anany, M.N.: Numerical Modelling of Combustion Processes at Elevated Pressures. Dissertation Universität Stuttgart (2010)
- Dhungel, B.: Experimental Investigations on Combustion and Emission Behaviour During Oxy-Coal Combustion. Dissertation Universität Stuttgart (2010)

9 Forschungsprogramme des Bundes und der EU

9.1 Angaben, ob weitere Drittmittel zum Projektthema eingeworben wurden, insbesondere aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen des Bundes und der EU

COORETEC: Verbundprojekt "Korrosion und Verschlackung in Hochtemperaturkraftwerken mit neuen Werkstoffen" ADECOS: ADECOS-ZWSF-Projekt



EU: Beteiligung an diversen Projekten des 6. und 7. Rahmenprogramms, teilweise als Koordinator, u.a. an folgenden früheren und laufenden Projekten:

"OxyBurner" (Development of Advanced Large Scale Low NO_x Oxy-Fuel Burner for PF Combustion)

"OxyMod" (Development and Experimental validation of a Mathematical Modelling Methodology for Oxy-Fuel Combustion for $\rm CO_2$ Capture)

"ENCAP" (Enhanced Capture of CO₂)

"OxyCorr" (Boiler Corrosion under Oxy-fuel Conditions)

9.2 Geplante Antragsstellung bzw. künftige Förderung aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen

EU: "Relcom" (Reliable and efficient combustion of Oxygen/Coal/ Recycles flue gas mixtures)



Arbeitskreis Kraftwerkssysteme und Dampferzeuger

Projekt: BW L 29DE

Untersuchung von Schweißungen an Nickelbasislegierungen mit Hilfe thermischer Simulation und Klärung von Schädigungsmechanismen in hochtemperaturbeanspruchten Schweißnähten

Projektleiter:	Prof. DrIng. Karl Maile Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart
Mitarbeiter:	DiplIng. Magdalena Speicher DrIng. Andreas Klenk
Finanzierung:	Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg

1 Ausgangssituation

Durch die Anhebung der Dampfparameter zur Steigerung des Wirkungsgrades von Dampfkesselanlagen mit dem Ziel der CO₂-Reduzierung entsteht neben dem bisherigen primären Fokus der Zeitstandfestigkeitseigenschaften und generellen Verarbeitbarkeit von Werkstoffen für den Kraftwerksbau ein weiterer Betrachtungsschwerpunkt in der zuverlässigen Herstellung von Schweißverbindungen und der Gewährleistung der Sicherheit und Verfügbarkeit von Komponenten in hoch-effizienten Kraftwerksanlagen. Für den höchsten Beanspruchungsbereich sind die bisher verwendeten Werkstoffe nicht geeignet, daher muss in zunehmendem Maße auf Nickelbasislegierungen übergegangen werden, siehe Abbildung 1a. Besonders die Erhöhung der Temperatur stellt erhebliche Ansprüche an den Nachweis der Langzeitbeständigkeit bezüglich Korrosion, Festigkeit und Verformungsfähigkeit der einzusetzenden Strukturwerkstoffe. Da Fertigungsschritte wie z.B. Schweißen unvermeidbar sind, müssen auch die Verarbeitungsverfahren qualifiziert und mögliche Schädigungsmechanismen untersucht werden. Grundsätzlich kann das Schädigungsverhalten im Langzeitbereich dieser Werkstoffklasse nur eingeschränkt auf der Basis der bekannten warmfesten Stähle beurteilt werden.





Abbildung 1: a) Größere Effektivität durch die Entwicklung neuer Werkstoffe, b) Parameterfenster zur schweißtechnischen Verarbeitung (nach [6])

Die Untersuchung und Erprobung von Werkstoffen für Komponenten des Kraftwerksbaus bei Temperaturen oberhalb 700 °C erfolgte in einer Reihe von Projekten [7, 8, 9], die der Legierungsentwicklung und -optimierung (z.B. MARCKO-DE 2 [10] und MARCKO-DT5 [11]) und Untersuchungen zur Herstellbarkeit und Werkstoffgualifizierung (z.B. MAR-CKO700 [12]) dienen sollten. Im Rahmen von [10] wurde die Legierung Alloy 617 gezielt weiterentwickelt. Auf der Grundlage einer Analyseneinschränkung hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung konnte für den wichtigen Temperaturbereich 650°C bis 720°C eine deutliche Verbesserung der Zeitstandfestigkeit erzielt werden. Damit steht ein großtechnisch verarbeitbarer Werkstoff mit ausreichender Festigkeit für den Einsatz im zukünftigen 700 °C-Dampfkraftwerk zur Verfügung. Für diesen Werkstoff und mit verschiedenen Verfahren hergestellten Schweißverbindungen liegen darüber hinaus Ergebnisse aus Untersuchungen im Rahmen eines Qualifizierungsprogramms für den Hochtemperaturreaktor [13] vor. Als ein möglicher weiterer Werkstoff für den höchsten Temperatureinsatzbereich wurde die aushärtbare Nickelbasislegierung Alloy 263 weiteren Untersuchungen unterzogen, die vor allem im europäischen Thermie-Projekt AD700 [14] durchgeführt wurden. Der Werkstoff Alloy 263 erhält seine gegenüber dem Werkstoff Alloy 617 bessere Zeitstandfestigkeit in erster Linie durch eine aushärtende Wärmebehandlung, die jedoch in Bezug auf die Verarbeitung sowohl für die Rohrherstellung als auch die Schweißbarkeit Probleme aufwirft. Untersuchungen zur Verarbeitbarkeit, dem langzeitigen Verhalten von Komponenten, insbesondere Rohre, Schmiedeteile (Cooretec-Projekte DE2 [15] und DE4 [16]) und Turbinenrotoren und -gehäuse (Cooretec-Projekte DT3 [17] und DT4 [18]) sowie deren Auslegung und Berechnung werden im Rahmen verschiedener Projekte der Cooretec-Initiative untersucht.

Im Kraftwerksbereich wurden bislang überwiegend gut schweißbare ferritische und martensitische Werkstoffe eingesetzt, für die sowohl im Kesselbau als auch bei dickwandigen Rohrleitungen bzw. Guss- und Schmiedeteilen langjährige praktische Erfahrungen vorliegen. Die Schweißung von Nickellegierungen stellt sich insbesondere für Bauteile mit größeren Wandstärken komplexer dar. Da auch bei Montagearbeiten auf der Baustelle solche Schweißungen durchgeführt werden müssen, muss der Schweißprozess entsprechend optimiert und festgelegt sein. Entscheidend für die Gewährleistung eines sicheren und zuverlässigen langzeitigen Einsatzes von Komponenten mit Schweißverbindungen ist neben dem Zeitstandverhalten auch ein möglichst fehlerfreier Zustand der Schweißnähte.



Wie in Abbildung 1b schematisch dargestellt, ist die Bandbreite der möglichen Schweißparameter für die oben genannten Nickelbasislegierungen erheblich schmäler im Vergleich zu anderen Werkstoffen. Dies bedeutet, dass die wesentlichen Parameter während des Schweißens unbedingt eingehalten werden müssen. Probleme liegen hierbei neben dem Abbrand von Legierungselementen, das durch Verfahrensoptimierung und Optimierung der chemischen Zusammensetzung [19] verbessert werden kann, in der den Werkstoffen eigenen höheren Empfindlichkeit gegenüber Heißrissbildung während dem Schweißen. Ebenso wurde für Nickellegierungen über Relaxationsrissbildung berichtet [20]. Sowohl die Heißriss- als auch die Relaxationsrissbildung ist auf metallurgische Vorgänge während des Schweißens und nachfolgende Veränderungen des nach dem Abkühlen vorliegenden Gefüge- und Ausscheidungszustandes zurückzuführen. Hierzu liegen bislang keine gezielt und zusammenhängend durchgeführten Untersuchungen vor, die aus den metallografischen Befunden Maßnahmen für die Durchführung von Schweißung und Wärmebehandlung ableiten lassen.

Die MPA Universität Stuttgart war und ist an den im obigen Abschnitt beschriebenen abgeschlossenen und derzeit bearbeiteten Projekten zur Werkstoffqualifizierung beteiligt. Auf dort ermittelte Ergebnisse und Erfahrungen für Schweißverbindungen von Nickellegierungen kann zurückgegriffen werden. Des Weiteren sind vor allem metallografische und elektronenmikroskopische Untersuchungen an Grundwerkstoffen aus diesen Programmen als Referenz für die vorgesehenen Untersuchungen nutzbar. Im Bereich der thermischen Simulation wurden eine ganze Reihe von Untersuchungen zur Schweißsimulation für Plattierungen und Verbindungen an einer speziellen Versuchseinrichtung zur thermomechanischen Simulation (Gleeble-Anlage) durchgeführt. Weitreichende Erfahrung aus einer Reihe von in den letzten 10 Jahren durchgeführten Untersuchungen zur Legierungsentwicklung und Schädigungsentwicklung [21] bei langzeitiger Beanspruchung liegen bei der Charakterisierung von Gefügezuständen mit Hilfe von Licht-, Raster- und Transmissionselektronenmikroskop vor.

2 Projektziele

Die Steigerung der Anlagenwirkungsgrade kann, wie im vorhergehenden Abschnitt aufgeführt, über eine deutliche Erhöhung der Prozessdrücke und -temperaturen erreicht werden. Nach realistischen Planungen können bei solchen Anlagen mittel- bis langfristig Frischdampfdrücke von über 300 bar und Frischdampftemperaturen von mehr als 700°C realisiert werden, vgl. Abbildung 1a. Die für die Herstellung von geschweißten Komponenten und die Konstruktion der Rohrleitungssysteme geeigneten Werkstoffe, die sich derzeit in der Qualifizierungsphase befinden, sind in Bezug auf die beim Schweißen stattfindenden Vorgänge wie Wärmeeintrag, Erwärmung und Abkühlung mit hohen Gradienten wesentlich empfindlicher als bisher in diesem Bereich eingesetzte Werkstoffe. Sie erfordern deshalb bei der Auswahl des Schweißprozesses, der Einstellung der Schweißparameter und der Ausführung der Schweißung eine wesentlich höhere Sorgfalt (Abbildung 1a). Im Einzelnen sind die ablaufenden Vorgänge hierbei noch nicht ausreichend erforscht. Dadurch besteht die Gefahr, dass in Schweißverbindungen durch den Schweißvorgang hervorgerufene Schädigungen wie Heißrissbildung, Schrumpfrisse, reheat-cracking oder Relaxationsrissbildung auftreten.



Zur optimalen Ausführung von Schweißnähten und zur Vermeidung von Fehlern in Schweißnähten an Nickelbasislegierungen insbesondere am Werkstoff Alloy 617 und am Werkstoff Alloy 263 sollen deshalb folgende Einflussparameter gezielt untersucht werden:

- · Chemische Zusammensetzung von Grund- und Schweißzusatzwerkstoff
- Schweißparametern, insbesondere Wärmeeintrag und -behandlung der Naht
- Kaltverformung bei der Herstellung und Schweißnahtvorbereitung
- Zusatz-, Montage- oder Eigenspannungen

Aus den Untersuchungsergebnissen werden grundsätzliche Erkenntnisse zu Fehlermechanismen abgeleitet und mit den Einflussparametern korreliert.

2.1 Umsetzung der Hinweise aus den bisherigen Begutachtungen

Die Hinweise aus der Zwischenbegutachtung wurden folgendermaßen umgesetzt.

Als Maßnahmen zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses wurden im Rahmen des Projekts zwei Studienarbeiten und eine Diplomarbeit durchgeführt. (siehe Abschnitt 8). Veröffentlichungen über die Vorhabensergebnisse sind in Vorbereitung.

3 Vernetzung

3.1 Vernetzung innerhalb KW21

Innerhalb der KW21-Initiative wurden Vernetzungen zu den Teilprojekten BY 11GT und BY 05DE aufgebaut, die sich ebenfalls mit Nickelbasislegierungen bzw. gleichen Werkstoffen befassten.

Beim Teilprojekt BY 11GT fand ein Austausch hinsichtlich des Erstarrungsverhaltens der Nickelbasiswerkstoffe statt. Dies hat einen relevanten Einfluss auf die Eigenschaften der in dieser Arbeit untersuchten artgleichen Schweißverbindungen. Dem Teilprojekt BY 05 DE wurden die Werkstoffdaten von Alloy 617 zur Verfügung gestellt, die in diesem Vorhaben die Grundlage der Modellierung des dynamischen Verhaltens von 700°C-Kraftwerken darstellten.

3.2 Vernetzung außerhalb KW21

Außerhalb von KW21 fand ein Austausch mit folgenden Institutionen und Firmen statt: Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM in Freiburg, IfW Darmstadt, E.ON., BAB-COCK-HITACHI in Kure / Japan. Ebenfalls konnten Synergien in Forschungsprojekten wie COORETEC-DE4 [16] sowie HWT I [22] und HWT II [23] genutzt werden.

4 Vorgehensweise und Methodik

Zur Realisierung der oben geschilderten Zielsetzung wurde ein Programm erstellt, das sich in folgende Arbeitspakete gliedert:

- Arbeitspaket A1: Metallografische Untersuchung nach dem Schweißen
- Arbeitspaket A2: Thermische Simulation am Grundwerkstoff



- Arbeitspaket A3: Ermittlung der Eigenspannungszustände
- Arbeitspaket A4: Metallografische und elektronenmikroskopische Untersuchungen von thermisch simulierten Proben
- Arbeitspaket A5: Zusammenfassende Bewertung und Berichterstellung

Im Folgenden wird auf die Ergebnisse einzelner Arbeitspakete eingegangen.

5 Projektergebnisse und Ausblick

Im Projekt wurden Nickelbasislegierungen Alloy 617 mod. und Alloy 263 untersucht. Die chemische Zusammensetzung der Werkstoffe ist in Tabelle 1 zusammengefasst.

Alloy 617 mod. gehört zu den mischkristall- und karbidverfestigenden Nickelbasislegierungen, die für hochtemperaturbeanspruchten Kraftwerkskomponenten angewendet werden. Der im lösungsgeglühtem Zustand eingesetzte Werkstoff zeichnet sich durch hohe Festigkeit, gute Stabilität und Oxidationsbeständigkeit aus.

Alloy 263 ist eine Nickel-Chrom-Kobalt-Legierung, die zur Gruppe der ausscheidungshärtbaren Superlegierungen gehört. γ '-Teilchen (intermetallische Phase Ni₃(Al,Ti)) und der Mischkristall sorgen für sehr gute Festigkeit, auch im Langzeitbereich.

Werkstoff		C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Co %	Mo %	AI %	Ti %	Fe %	В %
A617 mod [24, 10]	Min.	0,05					21	11	8	0,8	0,3		0,002
	Max	0,08	0,3	0,3	0,012	0,008	23	13	10	1,3	0,5	1,5	0,005
Alloy 263 [25]	Min.	0,04					19	19	5,6	0,3	1,9		
	Max	0,08	0,4	0,6	0,015	0,007	21	21	6,1	0,6	2,4	0,7	0,005

Tabelle 1:	Chemische	Zusammensetzung	der untersuchter	n Werkstoffe

5.1 Metallografische Untersuchung nach dem Schweißen

Für die Schweißung von Nickellegierungen kommen artgleiche Schweißzusätze zum Einsatz, die in ihrer chemischen Zusammensetzung in Bezug auf das Abbrandverhalten der Elemente und die Verarbeitbarkeit optimiert sind. Untersucht wurden in der Arbeit Schweißzusätze und Grundwerkstoffe für die beiden genannten Legierungen Alloy 617mod. sowie Alloy C263.

Die metallografische Untersuchung umfasste neben der Bestimmung von Härte, Korngröße und ähnlichen kennzeichnenden Größen sowie lichtoptischer Untersuchung auch eine Untersuchung am Raster (REM)- und Transmissionselektronenmikroskop (TEM) zur Ermittlung des Ausscheidungszustandes im Ausgangszustand, der als Bezug für weitere Untersuchungen und eine Grundcharakterisierung der Werkstoffe diente. Die Grundcharakterisierung (lichtoptisch) wurde für verschiedene Verbindungen durchgeführt, für ausgewählte Zustände wurden REM- und TEM-Untersuchungen am Schweißgut und Grundwerkstoff durchgeführt.

In Abbildung 2 ist beispielhaft das Gefüge der Schweißnaht aus Alloy 617 mod. gezeigt, die mit Hilfe des vWIG-Orbital-Schweißverfahrens (vollmechanisches Wolfram-Inertgas-



Schweißen mit Impulslichtbogen) erzeugt wurde. Hier erfolgte die Charakterisierung an drei Positionen in der Decklage, Nahtmitte und Wurzel in unterschiedlichen Bereichen der Schweißnaht. Die Kornstruktur im Grundwerkstoff (GW) ist sehr inhomogen. Darüber hinaus weist der Werkstoff häufig zahlreiche Zwillinge auf und neigt zur Bildung von zeiligen Strukturen. Einzelne, relativ große Karbonitride vom Typ Ti(C,N) sind im Gefüge bereits lichtoptisch ersichtlich.



Abbildung 2: Metallografische Charakterisierung der Naht eines ZÜ-Rohres (vWIGp-Orbital Schweißung), Alloy 617 mod. und Härteverlauf (HV1)

Im Schweißgut (SG) ist eine typische dendritische Struktur ausgebildet. Das Schweißgut sowie die benachbarte Wärmeeinflusszone waren frei von Heißrissen und Bindefehlern. An drei bereits genannten Positionen wurden Härtemessungen (HV1) durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Härtereihen wurden quer zur Naht gemessen. Die Härte ist tendenziell im Schweißgut und in der Wurzel am größten und liegt im Bereich von 200 HV1 (Grundwerkstoff) bis 300 HV1 (Schweißgut).

Da die hier untersuchten Werkstoffe, wie bereits bemerkt, ein inhomogenes Korngefüge aufweisen, wurde die Korngröße (nach ASTM) in einem Bereich angegeben. Die Korngröße beträgt in den Nähten von G=0 bei größeren Körner bis 1,5 (2,0) bei kleinerem Korn. Wird der Bereich der WEZ dem Grundwerkstoff gegenübergestellt, so ist kein signifikant vergröbertes Korn festzustellen.

Die REM-Aufnahmen zeigen in Abbildung 3, exemplarisch für die vWIG-Orbital-Naht, die Ausbildung von Ausscheidungen (Karbide) an den Korngrenzen, die die Schwachstelle bei Kurzzeitbeanspruchung in Alloy 617 mod. darstellen. Im GW sind die Cr-reichen Teilchen an den Korngrenzen überwiegend in filmartiger Form zu sehen. Die Ausbildung der Karbide in der WEZ erscheint zum Teil ähnlich, zum Teil sind separate Teilchen zu beobachten. Im SG wird die perlenschnurartige Belegung von Korngrenzen durch die Karbide beobachtet, die abwechselnd mit nadelförmigen, senkrecht zur Korngrenzen ausgerichteten Teilchen in dem Bereich vorkommt.





Abbildung 3: REM-Aufnahmen der Naht eines ZÜ-Rohres (vWIGp-Orbital Schweißung) a) Grundwerkstoff b) Wärmeeinflusszone c) Schweißgut

5.2 Thermische Simulation am Grundwerkstoff

Mit Hilfe der thermischen Simulation sollten Schweiß- und Wärmebehandlungsvorgänge nachgebildet werden. Dabei können Temperaturgänge entsprechend den Änderungen der Verfahrensparameter variiert werden und zusätzlich mechanische Beanspruchungen aufgebracht werden. Damit lassen sich Zwängungen und Zusatzbeanspruchungen beim Schweißvorgang nachbilden. Die so eingestellten Gefügezustände wurden metallografisch und elektronenmikroskopisch untersucht und mit Zuständen aus realen Schweißverbindungen verglichen.

Bevor die thermische Simulation durchgeführt wurde, wurden Analysen in Bezug auf die Ausbildung des Temperaturfeldes quer zur Schweißrichtung während eines Schweißvorganges durchgeführt. Unter Verwendung von 20 Thermoelementen und einer Messwerterfassung mit einer Messrate von 100 Hz gelang es Erkenntnisse zur Temperaturausbildung in der Schweißnaht zu gewinnen. Somit konnten die spezifischen Parameter wie Aufheizraten und Abkühlgeschwindigkeiten für die geplanten thermischen Simulationen und die Abbildung der Wärmeeinflusszone für beide Werkstoffe Alloy 617 mod. und Alloy 263 gewonnen werden.

Die Überhitzungen wurden in der Anlage Gleeble 2000 A-A zuerst für Alloy 617 mod. im Temperaturbereich von 900°C bis 1320°C durchgeführt. Anschließend wurden so erzeugte Zustände einem darauf folgenden Warmzugversuch mit einer Dehnrate von 10⁻⁶/s unterzogen bis zum Erreichen von 10 % Gesamtdehnung, bzw. einem Relaxationsversuch bis zu einer Gesamtdehnung von 1 %. Beide Arten der Versuche wurden bei einer Prüftemperatur von 700°C durchgeführt.

Abbildung 4a zeigt den Verlauf der Fließkurve, die im nach dem thermischen Zyklus bei 1300°C durchgeführten Warmzugversuch gewonnen wurde. Zu erkennen sind die Krafteinbrüche mit zunehmender Dehnung, welche für diesen Werkstoff charakteristisch sind. Dieses unstetige Verformungsverhalten im Temperaturbereich 0,2...0,5·T_s (Schmelztemperatur) ist die Folge einer Wechselwirkung zwischen den Versetzungen mit Fremdatomen und wird als dynamische Reckalterung bzw. Portevin-Le Chatelier- Effekt bezeichnet [26]. Bei der Probe mit Zyklus 1320°C wurden nach dem Warmzugversuch zahlreiche Risse sowohl in der Probenmitte als auch an der Oberfläche beobachtet. Die Probe mit 1300°C ist nach dem Erreichen von 8 % Dehnung, auch im wiederholten Versuch, als einzige im Warmzugversuch gebrochen, siehe Abbildung 4a. Andere Zustände, die Temperaturzyklen bei niedrigeren Temperaturen erfahren haben, haben die Gesamtdehnung von



10 % erreicht und es traten dabei keine Risse auf. Die Risse, die beobachtet wurden, zeigten immer einen interkristallinen Verlauf, siehe Abschnitt 5.4. Im Relaxationsversuch (Probe mit Zyklus 1300°C) wurde eine Gesamtdehnung von ϵ =1% aufgebracht und Spannungen relaxierten bis ca. 22 h. Danach wurde die Probe ohne Bruch ausgebaut. Wie in Abbildung 4b gezeigt, nimmt die Spannung relativ langsam ab.



Abbildung 4: a) Alloy 617 mod., Warmzugversuch (WZV) bei 700°C nach dem Zyklus 1300°C; b) Alloy 617 mod., Relaxationsversuch (Relax) bei 700°C nach dem Zyklus 1300°C c) Alloy 263, Warmzugversuch (WZV) bei 700°C nach dem Zyklus1285°C

In Abbildung 4c ist die Fließkurve von Alloy 263 gezeigt, die im Warmzugversuch nach einer Überhitzung bei 1285°C erzielt wurde. Die Probe wurde bis ca. 10 % gedehnt und ohne Bruch ausgebaut. Auch dieser Werkstoff zeigt den Effekt der dynamischen Reckalterung, allerdings in geringerem Maße als Alloy 617 mod. Aufgrund der nach der Überhitzung gemäß üblicher Wärmebehandlung durchgeführten Aushärtung (800°C/4h), besitzt der Werkstoff eine deutlich höhere Festigkeit als Alloy 617 mod.

An den überhitzten Zuständen von Alloy 617 mod. wurden die Härteverläufe entlang der Probenachse ermittelt, siehe Abbildung 5. Es zeigten sich hierbei nur geringfügige Differenzen zwischen den Proben, die nach der Überhitzung bei unterschiedlichen Temperaturen den Warmzugversuch erfahren haben. Dabei war eine Aufhärtung im beeinflussten Bereich (Probenmitte) festzustellen. Für die genannten Zustände lag die Härte auf vergleichbarem Niveau (320 HV10±10HV). Die Relaxationsprobe zeigt dagegen nur einen schwachen Anstieg der Härte nach dem Versuch nach vergleichbarer Prüfzeit bei gleicher Temperatur. Daraus kann geschlossen werden, dass bei der Aufhärtung die Spannung einen wesentlichen Einfluss auf die Ausscheidungsbildung hat.

Im Warmzugversuch findet eine spannungsinduzierte Bildung von Ausscheidungen statt, die diese Aushärtung erklären könnte. Im Relaxationsversuch dagegen ist keine Treibkraft dazu da, die Bildung von Teilchen zu begünstigen, da die Spannungen während des Versuchs relaxieren. Die Referenzprobe (nur nach dem Zyklus 1300°C) zeigte lediglich eine unwesentliche Aufhärtung.





Abbildung 5: Härteverläufe in thermisch simulierten (überhitzten) Proben, Alloy 617 mod.

Aus den bisher durchgeführten Untersuchungen kann außerdem gefolgert werden, dass die Überhitzungstemperatur mit 1300°C bei diesem Werkstoff kritisch zu sein scheint und unter Beanspruchung bei 700°C nach relativ kurzer Zeit zur Rissbildung/Bruch kommen kann. Diese Temperatur liegt, wie in [27] für eine Schmelze des Alloy 617 mod. gezeigt wurde, im Bereich zwischen <u>Nil S</u>trength <u>T</u>emperature (NST) und <u>Nil D</u>uctility <u>T</u>emperature (NDT), was bedeutet, dass das die Rissempfindlichkeit in diesem Bereich erhöht ist.

Nach jetzigem Kenntnisstand kann in Bezug auf die Zusatzspannungen beim Schweißen gefolgert werden, dass diese vermieden werden müssen, da die Spannung zur Aufhärtung (verstärkte Teilchenbildung) und damit zur Rissgefahr führen kann. Da der Abbau der Spannungen bei der Relaxation langsam verläuft, ist die Rissbildungsgefahr durch die Eigenspannungen, die während des Schweißens entstehen und bei hier untersuchten Werkstoffen groß sind (siehe Abschnitt 5.3), ebenfalls erhöht.

Die hier erzielten Erkenntnisse müssen jedoch durch weitere Untersuchungen abgesichert werden. Dafür sollten auch Zustände mit Mehrfachzyklen durchgeführt werden, um möglichst realitätsnahe Zustände zu erzielen.

5.3 Ermittlung der Eigenspannungszustände

Auf numerischem Wege wurde versucht, die durch das Schweißen entstehenden Eigenspannungen abzuschätzen. Basierend auf der Abschätzung des Eigenspannungsfeldes sollte mit Hilfe einer Berechnung unter Verwendung eines Kriechgesetzes die Verformungen während des Relaxationsvorganges im Bereich der Naht ermittelt werden. Dabei sollten exemplarisch unterschiedliche Ausbildungen der Fülllagen untersucht und mit den Schweißparametern korreliert werden.

Zuerst wurden die vorhandenen Werkstoffmodelle entsprechend angepasst. Für das Schweißgut und Grundwerkstoff wurden Zugversuche bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt und somit die schmelzenspezifischen Fließkurven für die Simulationen gewonnen. Die Modellerstellung erfolgte mit Abaqus[©]/CAE unter Ausnutzung der Axialsymmetrie der Rohre. Hierfür wurde ein zweidimensionales (2D) Modell erstellt. Die Mehr-


lagenschweißung wurde dabei ohne Raupen modelliert. Die Vernetzung des Modells wurde in kritischen Bereichen entsprechend feiner gewählt. In der FE-Berechnung wurde jeweils das Auftragen von einer gegenüber der realen Naht reduzierten Anzahl der Lagen simuliert. Die Simulation wurde mit Hilfe eines Stoffgesetzes durchgeführt, dass das Dilatations-, Formänderungs- und Fließverhalten der gefügten Werkstoffe beschreibt. Diese wurde als gekoppelte thermisch-mechanische Simulation ausgeführt, so dass sich die mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Werkstoffelemente gleichzeitig mit ihrer jeweiligen Temperatur ändern. Dabei wurde jeder Schweißzyklus über die Funktion der Temperatur und Zeit definiert.

Durch die gewählte Technik, "weiche" Elemente im Bereich des Schweißguts einzubringen, ergaben sich bereits bei der ersten Lage, in deren oberen Bereich, Druckeigenspannungen, die nicht realistisch erscheinen. Diese entstanden möglicherweise aufgrund vorgenommener Vereinfachungen hinsichtlich der Geometrie (2D) und der Ausführung der Simulation. Die Spannungsverteilung erscheint jedoch integral betrachtet bis auf die letzte Element-Lage plausibel, da sich der Bereich der Druckeigenspannungen weiter in Richtung Rohraußenoberfläche fortpflanzt. Deshalb wurde zur Auswertung die vorletzte Lage herangezogen.

Dies entspricht nicht exakt den Positionen, an welchen die Messungen durchgeführt wurden. Werden die experimentellen Ergebnisse den Ergebnissen der FE-Analyse gegenübergestellt, siehe Abbildung 6, können die Umfangsspannungen in der Fusionslinie relativ gut nachgebildet werden. Die Axialspannungen sind jedoch deutlich unterschätzt.



Spannungsverlauf entlang Pfad für Schweißnaht vWIG-Orbital

Abbildung 6: Vergleich Simulation – Experiment für eine vWIG-Orbital-Naht

Wie sich gezeigt hat, konnten die Eigenspannungen mithilfe des 2D-Modells nur unzureichend abgebildet werden. Aus diesem Grund wurden weitere Simulationen mit einem 3D-Modell durchgeführt, siehe Abbildung 7 a. Dabei wurde eine Berechnungsroutine zur numerischen Simulation einer Mehrlagenschweißnaht in Umfangsrichtung entwickelt. Die Schweißenergie wurde über die Schmelzbadtemperatur in die Elemente des Schweißzusatzwerkstoffs eingebracht.

Die Schweißgutelemente werden entsprechend der ermittelten Schweißgeschwindigkeit hinzugefügt. Sie weisen die temperaturabhängigen Werkstoffeigenschaften (Festigkeit,



Wärmeleitfähigkeit, etc.) auf. Beachtet werden hierbei auch Zwischenlagentemperaturen sowie Abkühlzeiten. Durch die mechanische Berechnung können nach dem Schweißen die entstehenden Eigenspannungen ausgewertet werden.



Abbildung 7: a) 3D-Modell des Rohres, b) Spannungsverteilung in Umfangsrichtung im Bereich der Schweißnaht nach der 3. Lage

Die 3D-Berechnungen werden im Rahmen einer Diplomarbeit durchgeführt (siehe Abschnitt 8). Diese wird bis zum Laufzeitende des Projektes abgeschlossen, und die vollständigen Ergebnisse werden zu diesem Zeitpunkt vorliegen.

Die Erkenntnisse zum Relaxationsverhalten der Schweißnähte werden in einer anschließenden Simulation mit Hilfe entsprechender Materialgesetze gewonnen.

5.4 Metallografische und elektronenmikroskopische Untersuchungen von thermisch simulierten Proben

Die durch thermische Simulation hergestellten Zustände wurden metallografisch charakterisiert. In den Untersuchungen wurden neben der makroskopischen und lichtoptischen Beschreibung der entstanden Gefüge (Korngröße, Dendritenausbildung etc.) gezielt Art und Morphologie von Ausscheidungen untersucht (z.B. Karbidausscheidungen an Korngrenzen und in der Matrix, Ausbildung der γ '-Phase und Ausbildung niedrigschmelzender Phasen an den Korngrenzen). Hierzu müssen je nach Größe der Ausscheidungen adäquate elektronmikroskopische Einrichtungen wie Raster-(REM) oder Transmissionselektronenmikroskop (TEM) und Analysemethoden (EDX etc.) zu Hilfe genommen werden.

Die thermisch simulierten Proben aus Alloy 617 mod. wurden nach unterschiedlichen Zyklen zuerst lichtoptisch untersucht. Zur Charakterisierung des Ausscheidungszustandes wurden die Proben im Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht, da die Teilchengröße der vorhandenen Ausscheidungen im Gefüge klein ist.



Bei den höchsten Überhitzungstemperaturen (1320°C und 1300°C) wurden viele Erscheinungen im Korn beobachtet, die schwer zu deuten waren, siehe beispielhaft Abbildung 8 a (Bereiche B). Die Untersuchungen im REM haben leichte Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung zwischen denen und der Matrix ergeben. Diese Bereiche sind mit Molybdän (Mo) und Chrom (Cr) angereichert und beinhalten häufig Mo-reiche Teilchen (Karbide).

Die EDX-Analysen zeigten, dass sich an den Korngrenzen die Cr-Teilchen (Karbide) befinden (Abbildung 8 b). Diese Ausscheidungen haben unterschiedliche Morphologie und sind auch in Form von filmartigen Teilchen an den Korngrenzen sichtbar. Die Belegung von Korngrenzen ist insgesamt inhomogen. Im Korninneren sind die gefundenen Teilchen (Karbide) deutlich kleiner im Vergleich zur Korngrenze. Zusätzlich werden Ausscheidungen der γ '-Phase in dem beeinflussten Bereich beobachtet (Abbildung 8 c). Allerdings ist die Teilchengröße sehr klein (<10nm), so dass für eine qualitative und quantitative Erfassung höher auflösende Analysen erforderlich sind. Da die Temperatur und Zeit entscheidend bei der Ausbildung der Ausscheidungsstruktur sind und sich die Karbide sowie γ '-Phase schon nach wenigen Minuten bzw. Stunden bei 700°C ausscheiden können, sind neben der Einflüssen aus der Überhitzung und der Spannung/Dehnung während des Warmzugversuchs auch diese beiden Faktoren immer zu berücksichtigen.



Abbildung 8: Alloy 617 mod., thermisch simulierter Zustand (Zyklus 1300°C) mit anschließendem Warmzugversuch bei 700 °C a) b), c) REM-Aufnahmen

Bei der Probe, die mit einem Überhitzungszyklus von 1300°C beaufschlagt wurde und anschließend einem Relaxationsversuch bis 1 %-Gesamtdehnung unterzogen wurde, wird tendenzmäßig eine geringere Anzahl der Karbide beobachtet (Abbildung 9). Die Anzahl der γ '-Teilchen scheint ebenfalls geringer zu sein und die Teilchen sind etwas größer, im Vergleich zum Zustand, der im Warmzugversuch geprüft wurde.



Abbildung 9: Alloy 617 mod., thermisch simulierter Zustand (Zyklus 1300 °C) mit anschließendem Relaxationsversuch bei 700 °C a) REM-Aufnahme der Korngrenze, b) REM-Aufnahme im Korn



Beim Alloy 263 wurden in einer Referenzprobe nach einer Überhitzung von 1285 °C mehrere Werkstofftrennungen in der Probenmitte gefunden, siehe Abbildung 10 a. Die REM-Untersuchungen haben ergeben, dass die Ausbildung der γ'-Phase im behandelten Bereich sehr inhomogen ist, siehe Abbildung 10 b. Im Gefüge finden sich Gebiete mit ganz kleinen Teilchen (ca. 15 nm), etwas größeren Ausscheidungen bei gleichzeitig geringerer Teilchendichte und Bereiche mit Teilchen einer Größe von etwa 100 nm. Dies ist möglicherweise der Einfluss der Überhitzung, der jedoch weiterer Untersuchungen bedarf. Darüber hinaus ist eine signifikante Korngrenzenbelegung festzustellen. Ein analoger Überhitzungszustand wurde, wie in Abschnitt 5.2 dargestellt, einem Warmzugversuch bei 700 °C unterzogen, und wurde nach dem Erreichen von 10 % Gesamtdehnung ohne Bruch ausgebaut.



Abbildung 10: Alloy 263, thermisch simulierter Zustand bei 1285°C a) licht-optische Aufnahme, poliert, b) REM-Aufnahme

In der Schweißnaht aus Alloy 263 sind in einzelnen Bereichen leichte Differenzen in der Größe der Karbide an den Korngrenzen festzustellen. Diese sind tendenziell im Grundwerkstoff größer. Überwiegend sind die Teilchen zusammenhängend und nur selten als separate Ausscheidungen zu sehen, was eine Schwachstelle im Versagensverhalten darstellen kann. Weitere Untersuchungen sind derzeit in der Abschlussphase und werden bis Ende der Projektlaufzeit beendet.

In der Arbeit konnten anhand durch thermische Simulation hergestellter Werkstoffzustände wichtige Erkenntnisse zur Ausbildung der Mikrostruktur in der nachgebildeten WEZ der Schweißverbindungen aus Nickellegierungen sowie zum Verformungs- und Versagensverhalten dieser Werkstoffzustande gewonnen werden. Die mikrostrukturellen Untersuchungen lieferten Hinweise bezüglich der Gefügeveränderungen unter Hochtemperaturbeanspruchung und ermöglichen somit die Bewertung des Einflusses des Gefüges auf das Versagensverhalten. Aus Warmzug- und Relaxationsversuchen konnten die Erkenntnisse zur Rissempfindlichkeit und zu den Rissbildungsmechanismen in den untersuchten Zuständen ermittelt werden. Eine weitere Absicherung ist jedoch an dieser Stelle notwendig. Mit Hilfe von Finite-Elemente-Simulationen wurde eine Vorgehensweise erarbeitet, die ermöglicht, den Eigenspannungszustand abzuschätzen. Dies ist besonders wichtig, da die Eigenspannungen den Versagensprozess der Schweißnähte und die Rissbildung wesentlich beeinflussen.



6 Wesentliche terminliche und inhaltliche Abweichungen zum Projektantrag

Bei der Bereitstellung von Schweißungen aus Alloy 263 ergab sich eine Verzögerung, da hier die Optimierungsphase für den Schweißzusatzwerkstoff erst spät abgeschlossen wurde. Durch das Vorziehen anderer Aufgaben konnte die Verzögerung zum Teil kompensiert werden.

Der im Antrag vorgeschlagene Lösungsweg konnte realisiert werden. Da es sich gezeigt hat, dass die Eigenspannungen in den Schweißungen aus Alloy 617mod. verhältnismäßig groß sind, musste eine Änderung in der Durchführung der thermischen Simulation vorgenommen werden. Diese wurde in der Gleeble-Anlage statt in der Induktionsanlage durchgeführt, um den Eigenspannungszustand realitätstreu abbilden zu können. Die Projektziele konnten im Wesentlichen erreicht werden.

7 Publikationen und Patente

7.1 Im Rahmen des Projektes entstandene Publikationen

7.1.1 Begutachtete Publikationen

Begutachtete Publikationen sind im Rahmen dieses KW21 Teilprojektes nicht entstanden, sind jedoch in Vorbereitung.

7.1.2 Nicht-begutachtete Publikationen

- [1] Speicher, M.; Klenk, A.; Roos, E.: Optimierung von Schweißverbindungen an Nickellegierungen. Vortrag beim KW21-Workshop, Karlsruhe, September 2010
- [2] Speicher, M.; Klenk, A.; Maile, K.; Roos, E.: Behaviour of Ni-Based Alloys for Fossil Power Plant Components in the Long Term Regime. Proceedings of the 8th International NIMS-MPA-IfW-Workshop on Advances in High Temperature Materials for High Efficiency Power Plants, 24-26 March 2010, National Institute for Materials Science, Tsukuba, Japan
- [3] Speicher, M.; Klenk, A.; Roos, E.: Untersuchung/Optimierung von Schweißverbindungen an Nickellegierungen. Vortrag beim KW21-Workshop, Garching, Oktober 2011
- [4] Speicher, M., R. Scheck, D. Willer, K. Maile: Methoden zur Quantifizierung von Gamma-Strich-Ausscheidungen in Nickelbasislegierungen mittels REM und TEM, Sonderbände der Praktischen Metallographie 43, 2011, S.43 - 48
- [5] Speicher, M.; Klenk, A.; Roos, E.: Untersuchung/Optimierung von Schweißverbindungen an Nickellegierungen. KW21-Abschlussveranstaltung, Stuttgart, September 2012

7.2 Gemeinsame Publikationen zweier oder mehrerer KW21 Teilprojekte

Publikationen mehrerer KW21 Teilprojekte sind nicht entstanden.

7.3 Weitere Publikationen

- [6] Heuser, H.: Schweißtechnische Verarbeitung neuer Kraftwerksstähle. Cluster-Forum Schweißtechnik im Kraftwerksbau SLV München, 20. Oktober 2009
- [7] Klenk, A.; Maile, K.; Theofel, H.; Helmrich, A.; Husemann, R.U.; Weiß, R.; Bendick, W.; Kremser, T.; Heinemann, J.; Lüdenbach, G.: Qualifizierung einer Nickelbasis-Legierung für Sammler und Rohrleitungen in Hocheffizienz-Kraftwerken. 28. Vortragsveranstaltung der Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle und der Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe, VDEh, 25.11.2005
- [8] Maile, K.; Klenk, A.; E. Roos: Qualifizierung von Hochleistungswerkstoffen für 700°C-Kraftwerke im Rahmen der Cooretec-Initiative. 30. Vortragsveranstaltung der Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle und der Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe, VDEh, 30.11.2007
- [9] Scholz, A.; Thoma, A.; Berger, C.: Mechanische Langzeiteigenschaften von Nickelbasis-Legierungen zur Anwendung in 700°C-Dampfturbinen. 26. Vortragsveranstaltung der Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle und der Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe, VDEh, 28.11.2003
- [10] MARCKO-DE2 : Neue Rohrwerkstoffe für Dampferzeuger mit Wirkungsgraden über 50%. Forschungsvorhaben BMWA-FKZ 0327062, AVIF A130, Abschlussbericht, MPA Stuttgart, September 2005
- [11] Thoma, A.: Nickelbasislegierung für den Einsatz als Rotorwerkstoff in Dampfkraftwerken oberhalb 700°C – Langzeitverhalten und Modellierung. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 5, Nr. 708, Dissertation TU Darmstadt, D17, 2004
- [12] MARCKO700: Werkstoffqualifizierung für das 700/720°C-Kraftwerk. Forschungsvorhaben BMWi 0326894, AVIF A215, Abschlussbericht 2010
- [13] Auslegungskriterien für hochtemperaturbelastete metallische und keramische Komponenten sowie des Spannbeton-Reaktordruckbehälters zukünftiger HTR-Anlagen-Teil B: Metallische Komponenten. Forschungsvorhaben des BMFT, KFA Jülich, Abschlussbericht, 08-1988
- [14] Advanced ("700°C") PF Power Plant (Contract No. SF/1001/97/DK and Contract No. ENK5- CT-2001-00511), Homepage: https://projectweb.elsameng.com/ AD700/Project%20info/Project%20information1.htm
- [15] Cooretec DE2: Eigenschaften Überhitzerwerkstoffe nach Kaltverformung
- [16] Cooretec-DE4: Untersuchungen zum langzeitigen Festigkeits- und Verformungsverhalten von Rohren und Schmiedeteilen aus Nickelbasis-Legierungen. Forschungsantrag FDBR Forschungsstiftung, 2006
- [17] Klein, T. et al.: Verhalten von optimierten Werkstoffen und Werkstoffverbunden für 700 - 720 °C-Dampfturbinenbauteile (MARCKO III). Abschlussbericht zum BMWi-Forschungsvorhaben Cooretec-DT3, Förderkennzeichen 0327754B, 2011
- [18] COORETEC DT4 (AG turbo IV): Lebensdauerkonzepte und bruchmechanische Beurteilung für Hochtemperaturdampfturbinen bis 720°C, Abschlussbericht, 2011



- [19] Heinemann, J.; Helmrich, A.; Husemann, R.U.; Maile, K.; Klenk, A.: Applicability of Ni-Based Welding Consumables for Boiler Tubes and Piping in the Temperature Range up to 720°C. 4th Int. Conference on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants. EPRI, (Ed.: R Viswanathan), Hilton Head Island, October 25-28, 2004
- [20] van Wortel, H.: Relaxation Cracking in the Chemical Process Industry From Catastrophic Failures to a Controlled Phenomenon. 27. Vortragsveranstaltung der Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle und der Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe, VDEh, 26.11.2004
- [21] Rauch, M.; Maile, K.; Seliger, P.; Reuter, A.; Tielsch, H.: Numerische Berechnung und experimentelle Validierung der Schädigungsentwicklung in 9%-Chromstählen. 27. Vortragsveranstaltung der Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle und der Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe, VDEh, 26.11.2004
- [22] Projekt 725 HWT GKM: Untersuchungen zum langzeitigen Betriebsverhalten von Rohren, Guss- und Schmiedeteilen aus Legierungen für zukünftige hocheffiziente Kraftwerke, BMWi Förderkennzeichen 0327799
- [23] Projekt HWT II: Untersuchung des Betriebs- und Versagensverhaltens dickwandiger Bauteile für hocheffiziente Kraftwerke, BMWi Förderkennzeichen 03ET2017
- [24] ThyssenKrupp VDM Data Sheet No.4119, Nicofer 5520 alloy 617, 2005
- [25] ThyssenKrupp VDM Data Sheet No.4020, Nicofer 5120CoTi–alloy C-263, 1993
- [26] Hähner, P.: On the physics of the Portevin-Le Chatelier effect part 1: The statisctics of dynamic strain ageing. Materials Science and Engineering A (1996), Vol. 207, S.216-223
- [27] Speicher, M.; Schmidt, K.; Klenk, A.; Maile, K.; Roos, E.: Weld behaviour of martensitic steels and Ni-based alloys for high temperature components. 36th MPA-Seminar, October 7 and 8, 2010, Stuttgart

7.4 Im Rahmen des Projektes entstandene Patente

Patente sind im Rahmen dieses KW21 Teilprojektes nicht entstanden.

8 Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses

8.1 Studentische Mitarbeiter

P. Buhl Unterstützung bei numerischen Berechnungen (Dipl.- Ing. Maschinenbau)



8.2 Studien-, Semester- und Bachelorarbeiten

 Ch. Schulze
 Experimentelle Ermittlung des Temperaturverlaufs in der Wärmeeinflusszone (WEZ) einer Schweißung aus Alloy 617mod. (Dipl.- Ing. Maschinenbau)

 J. Walker
 Untersuchungen des Schweißeigenspannungszustands in Schweißverbindungen aus Alloy 617 (Dipl.- Ing. Maschinenbau)

8.3 Diplom- und Masterarbeiten

J. Schleyer Simulation der Schweisseigenspannungen in einer dickwandigen Komponente aus Nickelbasis-Werkstoff (Dipl.- Ing. Maschinenbau)

8.4 Promotionen

Promotionen sind im Rahmen dieses KW21 Teilprojektes nicht entstanden. Die Arbeiten fließen jedoch in eine geplante Promotionsarbeit zur Eigenspannungsermittlung ein.

9 Forschungsprogramme des Bundes und der EU

9.1 Angaben, ob weitere Drittmittel zum Projektthema eingeworben wurden, insbesondere aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen des Bundes und der EU

Es wurden keine weiteren Drittmittel zum Projektthema eingeworben.

9.2 Geplante Antragsstellung bzw. künftige Förderung aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen von Bund, EU etc. sowie allgemeinen Förderprogrammen (z.B. DFG)

"Erweiterte Werkstoff- und Lebensdauerkonzepte auf Basis komplexer Versuche", Forschungsprojekt im Rahmen der Förderinitiative COORETEC, AG 1 Hocheffizientes Dampfkraftwerk und COORETEC Turbo 2020



Arbeitskreis Kraftwerkssysteme und Dampferzeuger

Projekt: BW W 29DE

Optimierung der Schweißverfahren an Nickelbasislegierungen in dick- und dünnwandigen Kesselbauteilen zur Vermeidung von Fehlern in hochtemperaturbeanspruchten Schweißnähten

Projektleiter:	Prof. DrIng. Karl Maile Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart
Mitarbeiter:	DiplIng. Magdalena Speicher
	DrIng. Andreas Klenk
Finanzierung:	Alstom Power Systems, Stuttgart
	EnBW Kraftwerke AG, Karlsruhe
	E.ON Energie AG, München
	Böhler Schweißtechnik Deutschland GmbH, Zweigniederlassung Bad Krozingen

1 Ausgangssituation

Durch die Anhebung der Dampfparameter zur Steigerung des Wirkungsgrades von Dampfkesselanlagen mit dem Ziel der CO₂-Reduzierung entsteht neben dem bisherigen primären Fokus der Zeitstandfestigkeitseigenschaften und generellen Verarbeitbarkeit von Werkstoffen für den Kraftwerksbau ein weiterer Betrachtungsschwerpunkt in der zuverlässigen Herstellung von Schweißverbindungen und der Gewährleistung der Sicherheit und Verfügbarkeit von Komponenten in hocheffizienten Kraftwerksanlagen.

Für den höchsten Beanspruchungsbereich (350 bar) sind die bisher verwendeten Werkstoffe nicht geeignet, daher muss es in zunehmendem Maße auf Nickelbasislegierungen übergegangen werden, siehe Abbildung 1a. Besonders die Erhöhung der Temperatur stellt erhebliche Ansprüche an den Nachweis der Langzeitbeständigkeit bezüglich Korrosion (Oxidation), die Festigkeit und die Verformungsfähigkeit der einzusetzenden Strukturwerkstoffe. Da Fertigungsschritte wie z.B. Schweißen unvermeidbar sind, müssen auch die Verarbeitungsverfahren qualifiziert und mögliche Schädigungsmechanismen untersucht werden. Grundsätzlich kann das Schädigungsverhalten im Langzeitbereich dieser Werkstoffklasse nur eingeschränkt auf der Basis der bekannten warmfesten ferritischen bzw. austenitischen Stähle beurteilt werden.





Abbildung 1: a) Größere Effektivität durch die Entwicklung neuer Werkstoffe, b) Parameterfenster zur schweißtechnischen Verarbeitung (nach [6])

Die Untersuchung und Erprobung von Werkstoffen für Komponenten des Kraftwerksbaus bei Temperaturen oberhalb 700 °C erfolgte in einer Reihe von Projekten [7, 8, 9], die der Legierungsentwicklung und -optimierung (z.B. MARCKO-DE 2 [10] und MARCKO-DT5 [11]) und Untersuchungen zur Herstellbarkeit und Werkstoffgualifizierung (z.B. MAR-CKO700 [12]) dienen sollten. Im Rahmen von [10] wurde die Legierung Alloy 617 gezielt weiterentwickelt. Auf der Grundlage einer Analyseneinschränkung hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung konnte für den wichtigen Temperaturbereich 650°C bis 720°C eine deutliche Verbesserung der Zeitstandfestigkeit erzielt werden. Damit steht ein großtechnisch verarbeitbarer Werkstoff mit ausreichender Festigkeit für den Einsatz im zukünftigen 700°C-Dampfkraftwerk zur Verfügung. Für diesen Werkstoff und mit verschiedenen Verfahren hergestellten Schweißverbindungen liegen darüber hinaus Ergebnisse aus Untersuchungen im Rahmen eines Qualifizierungsprogramms für den Hochtemperaturreaktor [13] vor. Als ein möglicher weiterer Werkstoff für den höchsten Temperatureinsatzbereich wurde die aushärtbare Nickelbasislegierung Alloy 263 weiteren Untersuchungen unterzogen, die vor allem im europäischen Thermie-Projekt AD700 [14] durchgeführt wurden. Der Werkstoff Alloy 263 erhält seine gegenüber dem Werkstoff Alloy 617 bessere Zeitstandfestigkeit in erster Linie durch eine aushärtende Wärmebehandlung, die jedoch in Bezug auf die Verarbeitung sowohl für die Rohrherstellung als auch die Schweißbarkeit Probleme aufwirft. Untersuchungen zur Verarbeitbarkeit, dem langzeitigen Verhalten von Komponenten, insbesondere Rohre, Schmiedeteile (COORETEC-Projekte DE2 [15] und DE4 [16]) und Turbinenrotoren und -gehäuse (COORETEC-Projekte DT3 [17] und DT4 [18]) sowie deren Auslegung und Berechnung werden im Rahmen verschiedener Projekte der COORETEC-Initiative untersucht.

Im Kraftwerksbereich wurden bislang überwiegend gut schweißbare ferritische und martensitische Werkstoffe eingesetzt, für die sowohl im Kesselbau als auch bei dickwandigen Rohrleitungen bzw. Guss- und Schmiedeteilen langjährige praktische Erfahrungen vorliegen. Die Schweißung von Nickellegierungen stellt sich insbesondere für Bauteile mit größeren Wandstärken komplexer dar. Da auch bei Montagearbeiten auf der Baustelle solche Schweißungen durchgeführt werden müssen, muss der Schweißprozess entsprechend optimiert und festgelegt sein. Entscheidend für die Gewährleistung eines sicheren und zuverlässigen langzeitigen Einsatzes von Komponenten mit Schweißverbindungen ist neben dem Zeitstandverhalten auch ein möglichst fehlerfreier Zustand der Schweißnähte.



Wie in Abbildung 1b schematisch dargestellt, ist die Bandbreite der möglichen Schweißparameter für die oben genannten Nickelbasislegierungen erheblich schmäler im Vergleich zu anderen Werkstoffen. Dies bedeutet, dass die wesentlichen Parameter während des Schweißens unbedingt eingehalten werden müssen. Probleme liegen hierbei neben dem Abbrand von Legierungselementen, das durch Verfahrensoptimierung und Optimierung der chemischen Zusammensetzung [19] verbessert werden kann, in der den Werkstoffen eigenen höheren Empfindlichkeit gegenüber Heißrissbildung während dem Schweißen. Ebenso wurde für Nickellegierungen über Relaxationsrissbildung berichtet [20]. Sowohl die Heißriss- als auch die Relaxationsrissbildung ist auf metallurgische Vorgänge während des Schweißens und nachfolgende Veränderungen des nach dem Abkühlen vorliegenden Gefüge- und Ausscheidungszustandes zurückzuführen. Hierzu liegen bislang keine gezielt und zusammenhängend durchgeführten Untersuchungen vor, die aus den metallografischen Befunden Maßnahmen für die Durchführung von Schweißung und Wärmebehandlung ableiten lassen.

Die MPA Universität Stuttgart war und ist an den im obigen Abschnitt beschriebenen abgeschlossenen und derzeit bearbeiteten Projekten zur Werkstoffqualifizierung beteiligt. Auf dort ermittelte Ergebnisse und Erfahrungen für Schweißverbindungen von Nickellegierungen kann zurückgegriffen werden. Des Weiteren sind vor allem metallografische und elektronenmikroskopische Untersuchungen an Grundwerkstoffen aus diesen Programmen als Referenz für die vorgesehenen Untersuchungen nutzbar. Im Bereich der thermischen Simulation wurden eine ganze Reihe von Untersuchungen zur Schweißsimulation für Plattierungen und Verbindungen an einer speziellen Versuchseinrichtung zur thermomechanischen Simulation (Gleeble-Anlage) durchgeführt. Weitreichende Erfahrung aus einer Reihe von in den letzten 10 Jahren durchgeführten Untersuchungen zur Legierungsentwicklung und Schädigungsentwicklung [21] bei langzeitiger Beanspruchung liegen bei der Charakterisierung von Gefügezuständen mit Hilfe von Licht-, Raster- und Transmissionselektronenmikroskop vor.

2 Projektziele

Die Steigerung der Anlagenwirkungsgrade kann, wie im vorhergehenden Abschnitt aufgeführt, über eine deutliche Erhöhung der Prozessdrücke und -temperaturen erreicht werden. Nach realistischen Planungen können bei solchen Anlagen mittel- bis langfristig Frischdampfdrücke von über 300 bar und Frischdampftemperaturen von mehr als 700°C realisiert werden, vgl. Abbildung 1a. Die für die Herstellung von geschweißten Komponenten und die Konstruktion der Rohrleitungssysteme geeigneten Werkstoffe, die sich derzeit in der Qualifizierungsphase befinden, sind in Bezug auf die beim Schweißen stattfindenden Vorgänge wie Wärmeeintrag, Erwärmung und Abkühlung mit hohen Gradienten wesentlich empfindlicher als bisher in diesem Bereich eingesetzte Werkstoffe. Sie erfordern deshalb bei der Auswahl des Schweißprozesses, der Einstellung der Schweißparameter und der Ausführung der Schweißung eine wesentlich höhere Sorgfalt (Abbildung 1a). Im Einzelnen sind die ablaufenden Vorgänge hierbei noch nicht ausreichend erforscht. Dadurch besteht die Gefahr, dass in Schweißverbindungen durch den Schweißvorgang hervorgerufene Schädigungen wie Heißrissbildung, Schrumpfrisse, reheat-cracking oder Relaxationsrissbildung auftreten.



Zur optimalen Ausführung von Schweißnähten und zur Vermeidung von Fehlern in Schweißnähten an Nickelbasislegierungen insbesondere am Werkstoff Alloy 617 und am Werkstoff Alloy C263 sollen deshalb folgende Einflussparameter gezielt untersucht werden:

- · Chemische Zusammensetzung von Grund- und Schweißzusatzwerkstoff
- · Schweißparameter, insbesondere Wärmeeintrag und -behandlung der Naht
- · Kaltverformung bei der Herstellung und Schweißnahtvorbereitung
- · Zusatz-, Montage- oder Eigenspannungen

Aus den Untersuchungsergebnissen sollen optimierte Verfahrensparameter und Handlungsanweisungen für die Ausführung von Schweißverbindungen in hochtemperaturbeanspruchten (>700°C) Bauteilen aus Nickelbasislegierungen abgeleitet werden. Dadurch sollen Maßnahmen zur Reduzierung der Sensitivität möglicher Schädigungen spezifiziert werden und Empfehlungen für das Schweißen und nachfolgende Wärmebehandlungen erarbeitet werden.

2.1 Umsetzung der Hinweise aus den bisherigen Begutachtungen

Die Hinweise aus der Zwischenbegutachtung wurden folgendermaßen umgesetzt:

die Maßnahmen zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses resultierten in zwei Studienarbeiten und einer Diplomarbeit (siehe Abschnitt 8). Die gewünschten Veröffentlichungen sind in Vorbereitung.

3 Vernetzung

3.1 Vernetzung innerhalb KW21

Innerhalb der KW21-Initiative wurden Vernetzungen zu den Teilprojekten BY 11GT und BY 05DE aufgebaut, die sich ebenfalls mit Nickelbasislegierungen bzw. gleichen Werkstoffen befassten.

Beim Teilprojekt BY 11GT fand ein Austausch hinsichtlich des Erstarrungsverhaltens der Nickelbasiswerkstoffe statt. Dies hat einen relevanten Einfluss auf die Eigenschaften der in dieser Arbeit untersuchten artgleichen Schweißverbindungen.

Dem Teilprojekt BY 05DE wurden die Werkstoffdaten von Alloy 617 zur Verfügung gestellt, die in diesem Vorhaben die Grundlage der Modellierung des dynamischen Verhaltens von 700 °C-Kraftwerken darstellten.

3.2 Vernetzung außerhalb KW21

Außerhalb von KW21 fand ein Austausch mit folgenden Institutionen und Firmen statt: Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM in Freiburg, IfW Darmstadt, E.ON., BAB-COCK-HITACHI K.K. in Kure/Japan. Ebenfalls konnten Synergien in Forschungsprojekten wie COORETEC-DE4 [16] sowie HWT I [22] und HWT II [23] genutzt werden.



4 Vorgehensweise und Methodik

Zur Realisierung der oben geschilderten Zielsetzung wurde ein Programm erstellt, das sich in folgende Arbeitspakete gliedert:

- Arbeitspaket B1: Beschaffung / Bereitstellung von Schweißzusatzwerkstoffen und Herstellung von repräsentativen Schweißverbindungen
- Arbeitspaket B2: Durchführung von Warmzugversuchen nach thermischer Simulation, Kurzzeitstandversuche und Relaxationsversuche an Schweißverbindungen
- Arbeitspaket B3: Mechanische Erprobung und Ermittlung der Eigenspannungszustände in Abhängigkeit von der Füllagenausbildung
- Arbeitspaket B4: Metallografische und elektronenmikroskopische Untersuchungen von Proben aus Schweißversuchen
- Arbeitspaket B5: Zusammenfassende Bewertung und Berichterstellung

Im Folgenden wird auf die Fortschritte einzelner Arbeitspakete eingegangen.

5 Projektergebnisse und Ausblick

Im Projekt wurden die Nickelbasislegierungen Alloy 617 mod. und Alloy 263 untersucht. Die chemische Zusammensetzung der Werkstoffe ist in Tabelle 1 zusammengefasst.

Werkstoff		C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Co %	Mo %	AI %	Ti %	Fe %	В %
A617 mod	Min.	0,05					21	11	8	0,8	0,3		0,002
[24, 10]	Max	0,08	0,3	0,3	0,012	0,008	23	13	10	1,3	0,5	1,5	0,005
Alloy 263	Min.	0,04					19	19	5,6	0,3	1,9		
[25]	Max	0,08	0,4	0,6	0,015	0,007	21	21	6,1	0,6	2,4	0,7	0,005

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der untersuchten Werkstoffe

Alloy 617 mod. gehört zu den mischkristall- und karbidverfestigender Nickelbasislegierungen, die für die hochtemperaturbeanspruchten Kraftwerkskomponenten angewendet werden. Der im lösungsgeglühtem Zustand eingesetzte Werkstoff zeichnet sich durch hohe Festigkeit, gute Stabilität und Oxidationsbeständigkeit aus.

Alloy 263 ist eine Nickel-Chrom-Kobalt Legierung, die zur Gruppe der ausscheidungshärtbaren Superlegierungen gehört. γ '-Teilchen (intermetallische Phase Ni₃(Al,Ti)) und der Mischkristall sorgen für sehr gute Festigkeit, auch im Langzeitbereich.



5.1 Beschaffung / Bereitstellung von Schweißzusatzwerkstoffen und Herstellung von repräsentativen Schweißverbindungen

Für die Schweißung von Nickellegierungen kommen artgleiche Schweißzusätze zum Einsatz, die in ihrer chemischen Zusammensetzung in Bezug auf das Abbrandverhalten der Elemente und die Verarbeitbarkeit optimiert sind. Untersucht wurden in der Arbeit Schweißzusätze und Grundwerkstoffe für die beiden genannten Legierungen Alloy 617mod. sowie Allov C263. Neben der Bereitstellung von Schweißzusatzwerkstoffen wurden Versuchsschweißungen hergestellt und von den Vorhabenspartnern zur Verfügung gestellt und danach mechanisch-technologisch charakterisiert. Versuchsschweißungen wurden durchgeführt mit Variation folgender Parameter: Schweißverfahren (z.B. E-Hand, WIG). Schweißparameter (Wärmeeintrag, Wärmebehandlung), Geometrie (Flankenwinkel, Nahtform, Wanddicke). Die Variation dieser Parameter führt zu unterschiedlicher Fülllagenausbildung. Die Versuchsschweißungen sollen im Hinblick auf die obigen Parameter repräsentativ sein für derzeit gebräuchliche Schweißverfahren wie konventionelle und Engspaltschweißungen, mechanisierte Verfahren etc. und deren Bandbreite abdecken. Die hergestellten Versuchsschweißverbindungen wurden einer Grundgualifikation einschließlich Auslagerung und Bestimmung der Zähigkeit im Zustand nach Schweißung und nach Auslagerung unterworfen.

		·
	Werkstoff	Halbzeug
V1	Alloy 617 mod	ZÜ-Rohr, da=500mm,t=30 mm, E-Hand
V2	Alloy 617 mod	ZÜ-Rohr, da=500mm,t=30 mm, vWIGp (Orbital)
V3	Alloy 617 mod	FD-Rohr,da=350mm,t=72,5 mm, vWIGp (Orbital)
V4	Alloy 617 mod	Kesselrohr, da=38mm, t=10mm
V5	Alloy 617 mod	Betriebsbeanspruchtes FD-Rohr, da=220mm, t=50mm, E-Hand
V6	Alloy 617 mod	Schweißung auf Platte
V7	Alloy 617 mod	Schmiedestab (d=260, l=500)
V8	Alloy 263	Schweißung auf Platte
V9&V10	Alloy 263	Geschmiedetes Rohr (t=20 mm) geschweißt in 2 Variationen
V11	Alloy 617 mod	LN-Rohr, t=30 mm, ZÜ-Leitung, Elektronenstrahlschweißen

Eine Übersicht der festgelegten Schweißungen ist in Tabelle 2 gezeigt.

Tabelle 2: Übersicht über die Versuchsschweißungen

Im Vorhaben wurden 8 Schweißverbindungen (V1 bis V7 und V11) an Alloy 617 mod. untersucht, sowie 3 Schweißungen an Alloy 263 (V8 bis V10). Die Versuchsschweißungen wurden größtenteils zur Verfügung gestellt.

In Abbildung 2 sind beispielhaft Makroaufnahmen der Nähte im Querschliff eines Zwischenüberhitzer(ZÜ)-Rohres dargestellt, die mit unterschiedlichen Schweißverfahren verschweißt wurden.





Abbildung 2: Alloy 617 mod.; Übersicht über die Schweißverbindung a) E-Hand, b) vWIG-Orbital

5.2 Durchführung von Warmzugversuchen nach thermischer Simulation, Kurzzeitstandversuche und Relaxationsversuche an Schweißverbindungen

An wärmebehandeltem Grundwerkstoff und den Versuchsschweißungen aus AP B1 wurden Warmzugversuche, Kurzzeitstandversuche und Relaxationsversuche (4-Punktbiegeversuche) zur Ermittlung des mechanischen Verhaltens durchgeführt und miteinander verglichen. Die Versuche wurden bei den Einsatztemperaturen 700 °C und stichprobenartig bei 650 °C durchgeführt.

Hierfür wurde eine endgültige Festlegung der Versuchsmatix zusammen mit dem begleitenden Arbeitskreises durchgeführt. Die Kurzzeitstandversuche bis auf die Zustände aus Alloy 263 konnten abgeschlossen werden. Ausgewählte Zustände wurden einer Wärmenachbehandlung bei 980 °C unterzogen, um deren Wirkung in Bezug auf die Relaxationsrissbildung feststellen zu können. Diese Zustände wurden im vergleichbaren Umfang wie die nicht wärmebehandelten Verbindungen untersucht.

In Abbildung 3a sind beispielhaft die Fließkurven gezeigt, die im Zugversuch bei 650 °C und 700 °C an Schweißverbindungsproben aus Verbindung V1 (Alloy 617 mod.) ermittelt wurden. Die Versuche wurden mit einer konstanten Dehnrate von 10⁻⁶/s durchgeführt. Es ist ersichtlich, dass das Verformungsverhalten der Nähte bei diesen beiden Prüftemperaturen deutlich unterschiedlich ist. Lokal betrachtet verformt sich der Grundwerkstoff (GW) bei 650 °C stark, die Dehnungen im Schweißgut (SG) bleiben gering. Bei 700 °C ist auch das Verformungsvermögen des Grundwerkstoffs eingeschränkt, was möglicherweise mit der verstärkten Ausscheidungsbildung bei dieser Temperatur im Zusammenhang steht. Abbildung 3b zeigt die Verformungswerte unterschiedlicher Schweißnähte nach dem Warmzugversuch. Bei der Bruchlage im SG werden tendenziell niedrigere Verformungswerte beobachtet. Nach der Wärmebehandlung bei 980 °C/3h verlagert sich die Bruchlage aus dem SG in den GW und die Verformung nimmt zu.

Mit Hilfe der Ergebnisse aus Versuchen an weiteren Schweißverbindungen wurde versucht Aufschluss über die Schädigungsmechanismen bei diesen Nähten gewinnen. Hierfür wurden außerdem die Befunde aus metallografischen Untersuchungen herangezogen, siehe Abschnitt 5.4.





Abbildung 3: a) Fließkurven für Schweißverbindungsproben, Alloy 617 mod.; b) Bruchverformungswerte (SG: Schweißgut, GW: Grundwerkstoff; WB: Wärmebehandlung bei 980 °C / 3h)

In Abbildung 4 sind die Ergebnisse der Kurzzeitstandversuche an Schweißverbindungsproben des Alloy 617 mod. zusammengestellt. So zeigt sich, dass die mit Hilfe des E-Hand-Verfahrens geschweißten Rohre und Platten eine im Vergleich zu anderen Proben niedrigere Zeitstandfestigkeit aufweisen.



Abbildung 4: Zeitstandschaubild Alloy 617 mod, T=700 °C

Die Schweißverbindungsproben aus der vWIG-Orbital-Schweißung (ZÜ-Rohr) zeigen ein deutlich besseres Verhalten, das sich dem Grundwerkstoff annähert. Dasselbe gilt für die Proben, die dem FD-Rohr entnommen worden sind. Allgemein ist festzustellen, dass alle Schweißverbindungsproben im Streuband für den Grundwerkstoff liegen. Darüber hinaus ist ein Einfluss der Wärmebehandlung bei 980 °C/3h ersichtlich. Werden die Proben dieser Wärmebehandlung unterzogen, so stellt sich heraus, dass die Bruchlage vom Schweißgut in den Grundwerkstoff verlagert wird. Somit erhöht sich die Zeitstandfestigkeit der Schweißverbindungsproben.

Außer integralen Festigkeits- und Verformungswerten werden auch die lokalen Eigenschaften in allen Versuchsarten ermittelt.



Abbildung 5: Auswertung von lokalen Dehnungen nach dem Zeitstandversuch

Abbildung 5 zeigt die lokalen Verformungswerte, die an zwei Proben der Versuchsschweißung V1 im Kurzzeitstandversuch bestimmt wurden. Alle Proben zeigten Brüche im Schweißgut. Die integralen Bruchdehnungswerte sind niedrig und liegen bei 650 °C bei 6 bis 8% und bei ca. 0,3 bis 0,9 % bei T=700 °C. Die lokalen Werte zeigten, dass bei T=650 °C die Verformung im Grundwerkstoff abläuft, und im Schweißgut sowie in der WEZ lediglich geringe Dehnungen erreicht werden konnten. Bei 700 °C wird eine höhere Verformung im Schweißgut als im Grundwerkstoff beobachtet.

Die an mehreren Schweißverbindungen durchgeführten Relaxationsversuche (4-Punkt-Biegeversuche) zeigten, dass die im Rahmen des Vorhabens gefertigten Schweißverbindungen eine sehr gute Festigkeit haben und trotz hohen aufgebrachten Dehnungen kein Versagen bzw. keine makroskopische Risse weder im Schweißgut noch in der Wärmeeinflusszone aufgetreten sind.

5.3 Mechanische Erprobung und Ermittlung der Eigenspannungszustände in Abhängigkeit von der Fülllagenausbildung

Mit Hilfe des Bohrlochverfahrens wurden Versuchsschweißungen hinsichtlich Eigenspannungen vergleichend charakterisiert und mit parallel dazu auf numerischem Wege ermittelten Eigenspannungen verglichen. Basierend auf der Abschätzung des Eigenspannungsfeldes von Versuchsschweißungen sollten mit Hilfe einer Berechnung unter Verwendung eines Kriechgesetzes die Verformungen während des Relaxationsvorganges im Bereich der Naht und Wärmeeinflusszone ermittelt werden. Dabei sollen exemplarisch unterschiedliche Ausbildungen der Fülllagen untersucht und mit den Schweißparametern korreliert werden.

Die Eigenspannungsmessungen wurden mit Hilfe des Bohrloch- sowie zusätzlich Ring-Kern-Verfahrens an den Verbindungen V1 bis V6 durchgeführt. Es wurde die Höhe der Eigenspannungen in der WEZ sowie im Schweißgut ermittelt.

ΚW



Die Messungen haben ergeben, dass direkt in der Fusionslinie deutlich höhere Zugeigenspannungen auftreten im Vergleich zu anderen Bereichen, generell wurden Zugeigenspannungen in Höhe von 300 bis 400 MPa ermittelt. Mit dem Ring-Kern-Verfahren wurden die Zugeigenspannungen in ähnlicher Größenordnung wie mit Hilfe des Bohrlochverfahrens gemessen. Nach einer Wärmebehandlung (980 °C/3h) werden die Eigenspannungen deutlich reduziert. Die Messungen an Rohlingen aus V2 (mit und ohne Wärmebehandlung) ergaben ein geringeres Niveau der Eigenspannungen (bis max. 50MPa).

Zur Klärung von unstetigen Verläufen über die Tiefe wurden metallografische Untersuchungen durchgeführt und mit den Ergebnissen korreliert. Mit Hilfe dieser Untersuchungen konnten einige Unklarheiten beseitigt werden. Im jeweiligen Diagramm ist nun eine entsprechende Makroaufnahme mit den Messpositionen dargestellt. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 6 dargestellt.



Abbildung 6: Eigenspannungen nach dem Schweißen und nach der Wärmebehandlung

5.4 Metallografische und elektronenmikroskopische Untersuchungen von Proben aus Schweißversuchen

Die durch thermische Simulation bzw. in Versuchsschweißungen hergestellten Zustände wurden metallografisch charakterisiert. In den Untersuchungen wurde neben der makroskopischen und lichtoptischen Beschreibung der entstanden Gefüge (Korngröße, Dendritenausbildung etc.) gezielt Art und Morphologie von Ausscheidungen untersucht (z.B. Karbidausscheidungen an Korngrenzen und in der Matrix, Ausbildung der γ '-Phase und Ausbildung niedrigschmelzender Phasen an den Korngrenzen). Hierzu wurden je nach Größe der Ausscheidungen adäquate elektronmikroskopische Einrichtungen wie Raster-(REM) oder Transmissionselektronenmikroskop (TEM) und Analysemethoden (EDX etc.) zu Hilfe genommen.

Es wurden auch Proben nach dem Versuch (Zeitstand-, Warmzugs- oder Relaxationsversuch) metallografisch untersucht, um das Schädigungsverhalten beschreiben zu können. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 7 gezeigt.





Abbildung 7: Lichtoptische Aufnahmen von Zeitstandproben aus der ZÜ-Naht (vWIG-Orbital), Alloy 617 mod.; a) Zustand ohne WB bei T=700 °C, b) Zustand mit WB bei T=700 °C

An den bei 700°C geprüften Zeitstandproben mit und ohne Wärmebehandlung nach dem Schweißen (980°C/3h) wurden Längsschliffe gefertigt und das Gefüge lichtoptisch charakterisiert. Bei der Probe, die keiner Wärmenachbehandlung unterzogen wurde, erfolgte der Bruch im Schweißgut. Es wurden hier einzelne Anrisse auf der Oberfläche der Proben beobachtet, überwiegend im Bereich des Schweißgutes. Im Schweißgut wurden außerdem weitere interdendritische Risse festgestellt. In der Wärmeeinflusszone wurden keine Risse gefunden. Im Bereich des Grundwerkstoffes wurden sehr kleine Oberflächenrisse entdeckt. Die Probe, die wärmebehandelt wurde, ist im Grundwerkstoff gebrochen (Abbildung 7b). Bei der Untersuchung zeigte sich, dass die interkristallinen Risse nur im Bereich des Grundwerkstoffs zu sehen waren. Das Schweißgut und die Wärmeeinflusszone waren hierbei frei von Rissen.

Mit Hilfe des Rastenelektronenmikroskopes mit sehr hoher Auflösung wurden die Untersuchungen an geprüften Zeitstandproben durchgeführt. So konnten die TEM-Untersuchungen im Umfang reduziert werden und durch geeignete REM-Untersuchungen ersetzt bzw. ergänzt werden. Abbildung 8 zeigt exemplarisch ein Ergebnis der Untersuchungen am Schliff für eine Zeitstandprobe, die bei 700°C geprüft wurde. Im linken Bild ist eine Übersicht des Gefüges zu sehen, im rechten Bild ist die Detailaufnahme im Korninneren mit Ausscheidungen von γ '-Phase und Karbiden ersichtlich.





Abbildung 8: REM-Aufnahmen einer Zeitstandprobe aus der ZÜ-Naht (E-Hand), Alloy 617 mod., a) Übersichtsaufnahme, b) Detailaufnähme

Mit Hilfe von TEM-Untersuchungen wurde die Ausscheidungs- und Versetzungsstruktur zuerst im Ausgangszustand einer ausgewählten Schweißnaht im Bereich des Grundwerkstoffs und Schweißgutes mit und ohne Wärmebehandlung durchgeführt, siehe Abbildung 9. Insgesamt wurden zwei Teilchenarten identifiziert, Karbide vom Typ $M_{23}C_6$ und vereinzelt die Primärteilchen Ti(C.N). Im Schweißzustand war im Schweißgut die Größe von $M_{23}C_6$ -Teilchen an den Korngrenzen und im Korninneren vergleichbar, jedoch wurden in diesem Beriech deutlich kleinere Ausscheidungen als im Grundwerkstoff gefunden. Die Anzahl von Teilchen im Schweißgut war deutlich höher im Vergleich zum Grundwerkstoff. Da die Versetzungsdichte im SG um Faktor 10 höher lag und die Defekte in der kristallografischen Struktur (Versetzungen) ein bevorzugter Ort zur Teilchenbildung darstellen, kann somit diese höhere Anzahl von Ausscheidungen erklärt werden.



Abbildung 9: a) Ergebnisse der TEM-Untersuchungen Alloy 617 mod., b) Versetzungsstruktur im Grundwerkstoff und c) im Schweißgut

Durch die Bildung von Teilchen bei der Wärmebehandlung bei 980°C/3h (kleine Ausscheidungen), wird der Mittelwert des Teilchendurchmessers im Korninneren reduziert. An den Korngrenzen tritt dagegen die Teilchenvergröberung auf. Die Ergebnisse an ausgewählten thermomechanisch beanspruchten Zuständen werden bis Ende der Projektlaufzeit vorliegen.

Letztendlich wurden, wie in Tabelle 3 exemplarisch für die Verbindung V2 (vWIG-Orbital) dargestellt, die Verformungs-, Versagens- und Härte-Karten der untersuchten Schweiß-



verbindungen erstellt, die die integralen und lokalen Verformungswerte, Härtewerte in unterschiedlichen Bereichen der Schweißnähte sowie die metallografischen Befunde beinhalten. Somit ist der Vergleich zwischen den Schweißverbindungen sofort erkennbar und die Korrelationen mit diversen Einflussparametern erleichtert.

		V2 o	hne WB	V2 mit WB			
	650°	C	70	0°C		7(00°C
Merkmale	WZV	ZSV	WZV	ZSV		WZV	ZSV
Versagensort	GW	-	SG	SG		GW	GW
Dehnung integral, %	>15	-	>5	> 5	>15 >1		
Dehnung	GW: > 15	1	GW: < 15	GW: < 5		GW: > 15	GW: > 15
lokal, %	SG: < 2	1	SG: >1	SG: > 2		SG: > 2	SG: > 2
Härte, HV10							
AZ: GW: o	GW: ++++	1	GW: +++	GW: +++	AZ: GW: +	GW: +++	GW: +++
SG: +	SG: +++	1	SG: +++	SG: ++++	SG: +	SG: +++	SG: +++
WEZ: O	WEZ:.+++	I	WEZ: +++	WEZ: +++	WEZ:+	WEZ:+++	WEZ:+++
Matallagraficata Rafunda	Rissverla	uf ID bzv	w. IK, Anriss	Rissverlauf IK, Anrisse an der			
wietanografische Befunde	Oberf	äche, W	EZ frei von	Oberfläche, WEZ frei von Rissen			

 Tabelle 3:
 Verformungs-Versagens-Härtekarte für eine Schweißverbindung, WZV: Warmzugversuch, ZSV: Zeitstandversuch, SG: Schweißgut, GW: Grundwerkstoff, WEZ: Wärmeeinflusszone, WB: Wärmbehandlung, ID: interdendritisch, IK: interkristallin

In der Arbeit wurden wichtige Erkenntnisse zum Verformungs- und Versagensverhalten von Schweißverbindungen aus Nickelbasislegierungen, die mithilfe unterschiedlicher Schweißprozesse hergestellt wurden, gewonnen. Die Schweißeigenspannungen, die in den untersuchten geschweißten Bauteilen relativ hohe Werte erreichen, wie sich bei der experimentellen Ermittlung gezeigt hat, konnten nach der durchgeführten Wärmebehandlung nach dem Schweißen deutlich reduziert werden. Dies ist besonders wichtig, da die Eigenspannungen den Versagensprozess der Schweißnähte und die Rissbildung bestimmen können. Die metallografischen und mikrostrukturellen Untersuchungen lieferten Hinweise bezüglich der Ausbildung des Gefüges im Schweißzustand sowie im Hinblick auf deren Änderungen unter Hochtemperaturbeanspruchung. Dies ermöglicht die Bewertung des Einflusses des Gefüges und deren Veränderungen auf das Versagensverhalten. Experimentelle Befunde aus Kurzzeitstand-, Warmzug- und Vierpunktbiegeversuchen lieferten Erkenntnisse zur Rissempfindlichkeit und zu den Rissbildungsmechanismen in den untersuchten Schweißverbindungen.

6 Wesentliche terminliche und inhaltliche Abweichungen zum Projektantrag

Bei der Bereitstellung der Versuchsobjekte ergab sich eine Verzögerung bei Schweißungen aus Alloy 263, da hier die Optimierungsphase für den Schweißzusatzwerkstoff erst spät abgeschlossen wurde. Durch das Vorziehen anderer Aufgaben konnte die Verzögerung zum Teil kompensiert werden. Die Arbeiten am aufgrund dieser Verspätung reduzierten Umfang der Schweißnähte aus Alloy 263 können aus heutiger Sicht im 1. Quartal 2013 abgeschlossen werden.



Der im Antrag vorgeschlagene Lösungsweg konnte realisiert werden und es müssen keine Änderung der Vorgehensweise oder Werkzeuge vorgenommen werden. Die Einhaltung der Projektziele ist realistisch.

7 Publikationen und Patente

7.1 Im Rahmen des Projektes entstandene Publikationen

7.1.1 Begutachtete Publikationen

Begutachtete Publikationen sind im Rahmen dieses KW21 Teilprojektes nicht entstanden, sind jedoch in Vorbereitung.

7.1.2 Nicht-begutachtete Publikationen

- [1] Speicher, M.; Klenk, A.; Roos, E.: Optimierung von Schweißverbindungen an Nickellegierungen. Vortrag beim KW21-Workshop, Karlsruhe, September 2010
- [2] Speicher, M.; Klenk, A.; Maile, K.; Roos, E.: Behaviour of Ni-Based Alloys for Fossil Power Plant Components in the Long Term Regime. Proceedings of the 8th International NIMS-MPA-IfW-Workshop on Advances in High Temperature Materials for High Efficiency Power Plants, 24-26 March 2010, National Institute for Materials Science, Tsukuba, Japan
- Speicher, M.; Klenk, A.; Roos, E.: Untersuchung/Optimierung von Schweißverbindungen an Nickellegierungen. Vortrag beim KW21-Workshop, Garching, Oktober 2011
- [4] Speicher, M., R. Scheck, D. Willer, K. Maile: Methoden zur Quantifizierung von Gamma-Strich-Ausscheidungen in Nickelbasis-Legierungen mittels REM und TEM, Sonderbände der Praktischen Metallographie 43, 2011, S.43 - 48
- Speicher, M.; Klenk, A.; Roos, E.: Untersuchung/Optimierung von Schweißverbindungen an Nickellegierungen. KW21-Abschlussveranstaltung, Stuttgart, September 2012

7.2 Gemeinsame Publikationen zweier oder mehrerer KW21 Teilprojekte

Publikationen mehrerer KW21 Teilprojekte sind nicht entstanden.

7.3 Weitere Publikationen

- [6] Heuser, H.: Schweißtechnische Verarbeitung neuer Kraftwerksstähle. Cluster-Forum Schweißtechnik im Kraftwerksbau SLV München, 20. Oktober 2009
- [7] Klenk, A.; Maile, K.; Theofel, H.; Helmrich, A.; Husemann, R.U.; Weiß, R.; Bendick, W.; Kremser, T.; Heinemann, J.; Lüdenbach, G.: Qualifizierung einer Nickelbasis-Legierung für Sammler und Rohrleitungen in Hocheffizienz-Kraftwerken. 28. Vortragsveranstaltung der Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle und der Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe, VDEh, 25.11.2005



- [8] Maile, K.; Klenk, A.; E. Roos: Qualifizierung von Hochleistungswerkstoffen für 700°C-Kraftwerke im Rahmen der Cooretec-Initiative. 30. Vortragsveranstaltung der Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle und der Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe, VDEh, 30.11.2007
- [9] Scholz, A.; Thoma, A.; Berger, C.: Mechanische Langzeiteigenschaften von Nickelbasis-Legierungen zur Anwendung in 700°C-Dampfturbinen. 26. Vortragsveranstaltung der Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle und der Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe, VDEh, 28.11.2003
- [10] MARCKO-DE2 : Neue Rohrwerkstoffe für Dampferzeuger mit Wirkungsgraden über 50%. Forschungsvorhaben BMWA-FKZ 0327062, AVIF A130, Abschlussbericht, MPA Stuttgart, September 2005
- [11] Thoma, A.: Nickelbasislegierung für den Einsatz als Rotorwerkstoff in Dampfkraftwerken oberhalb 700°C – Langzeitverhalten und Modellierung. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 5, Nr. 708, Dissertation TU Darmstadt, D17, 2004
- [12] MARCKO700: Werkstoffqualifizierung für das 700/720°C-Kraftwerk. Forschungsvorhaben BMWi 0326894, AVIF A215, Abschlussbericht 2010
- [13] Auslegungskriterien für hochtemperaturbelastete metallische und keramische Komponenten sowie des Spannbeton-Reaktordruckbehälters zukünftiger HTR-Anlagen–Teil B: Metallische Komponenten. Forschungsvorhaben des BMFT, KFA Jülich, Abschlussbericht, 08-1988
- [14] Advanced ("700°C") PF Power Plant (Contract No. SF/1001/97/DK and Contract No. ENK5- CT-2001-00511), Homepage: https://projectweb.elsameng.com/ AD700/Project%20info/Project%20information1.htm
- [15] COORETEC-DE2: Eigenschaften Überhitzerwerkstoffe nach Kaltverformung
- [16] COORETEC-DE4: Untersuchungen zum langzeitigen Festigkeits- und Verformungsverhalten von Rohren und Schmiedeteilen aus Nickelbasis-Legierungen. Forschungsantrag FDBR Forschungsstiftung, 2006
- [17] Klein, T. et al.: Verhalten von optimierten Werkstoffen und Werkstoffverbunden für 700 - 720 °C-Dampfturbinenbauteile (MARCKO III). Abschlussbericht zum BMWi-Forschungsvorhaben COORETEC-DT3, Förderkennzeichen 0327754B, 2011
- [18] COORETEC-DT4 (AG turbo IV): Lebensdauerkonzepte und bruchmechanische Beurteilung für Hochtemperaturdampfturbinen bis 720°C, Abschlussbericht, 2011
- [19] Heinemann, J.; Helmrich, A.; Husemann, R.U.; Maile, K.; Klenk, A.: Applicability of Ni-Based Welding Consumables for Boiler Tubes and Piping in the Temperature Range up to 720°C. 4th Int. Conference on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants. EPRI, (Ed.: R Viswanathan), Hilton Head Island, October 25-28, 2004
- [20] van Wortel, H.: Relaxation Cracking in the Chemical Process Industry From Catastrophic Failures to a Controlled Phenomenon. 27. Vortragsveranstaltung der Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle und der Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe, VDEh, 26.11.2004





- [21] Rauch, M.; Maile, K.; Seliger, P.; Reuter, A.; Tielsch, H.: Numerische Berechnung und experimentelle Validierung der Schädigungsentwicklung in 9%-Chromstählen. 27. Vortragsveranstaltung der Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle und der Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe, VDEh, 26.11.2004
- [22] Projekt 725 HWT GKM: Untersuchungen zum langzeitigen Betriebsverhalten von Rohren, Guss- und Schmiedeteilen aus Legierungen für zukünftige hocheffiziente Kraftwerke, BMWi Förderkennzeichen 0327799
- [23] Projekt HWT II: Untersuchung des Betriebs- und Versagensverhaltens dickwandiger Bauteile f
 ür hocheffiziente Kraftwerke, BMWi F
 örderkennzeichen 03ET2017
- [24] ThyssenKrupp VDM Data Sheet No.4119, Nicofer 5520 alloy 617, 2005
- [25] ThyssenKrupp VDM Data Sheet No.4020, Nicofer 5120CoTi–alloy C-263, 1993

7.4 Im Rahmen des Projektes entstandene Patente

Patente sind im Rahmen dieses KW21 Teilprojektes nicht entstanden.

8 Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses

8.1 Studentische Mitarbeiter

P. Buhl Unterstützung bei numerischen Berechnungen (Dipl.- Ing. Maschinenbau)

8.2 Studien-, Semester- und Bachelorarbeiten

- Ch. Schulze Experimentelle Ermittlung des Temperaturverlaufs in der Wärmeeinflusszone (WEZ) einer Schweißung aus Alloy 617mod. (Dipl.- Ing. Maschinenbau) J. Walker Untersuchungen des Schweißeigenspannungszustands in Schweißverbindungen aus Alloy 617
 - (Dipl.- Ing. Maschinenbau)

8.3 Diplom- und Masterarbeiten

J. Schleyer Simulation der Schweisseigenspannungen in einer dickwandigen Komponente aus Nickelbasis-Werkstoff (Dipl.- Ing. Maschinenbau)

8.4 Promotionen

Promotionen sind im Rahmen dieses KW21 Teilprojektes nicht entstanden. Die Arbeiten fließen jedoch in eine geplante Promotionsarbeit zur Eigenspannungsermittlung ein.



9 Forschungsprogramme des Bundes und der EU

9.1 Angaben, ob weitere Drittmittel zum Projektthema eingeworben wurden, insbesondere aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen des Bundes und der EU

Es wurden keine weiteren Drittmittel zum Projektthema eingeworben.

9.2 Geplante Antragsstellung bzw. künftige Förderung aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen von Bund, EU etc. sowie allgemeinen Förderprogrammen (z.B. DFG)

"Erweiterte Werkstoff- und Lebensdauerkonzepte auf Basis komplexer Versuche", Forschungsprojekt im Rahmen der Förderinitiative COORETEC, AG 1 Hocheffizientes Dampfkraftwerk und COORETEC Turbo 2020



DT

Arbeitskreis Fluiddynamik und Dampfturbine

Dr. Dirk Goldschmidt, Siemens AG, Mülheim an der Ruhr

- BY 8DT: Numerische Simulation der Druckschwankungen in Laufrädern von großen Francis Turbinen im Teil- und Überlastbetrieb und ihre Auswirkungen auf die Dauerfestigkeit
- BY 9DT: Rotordynamische Eigenschaften von Bürstendichtungen
- BW L 31DT: Temperaturabhängiges Verhalten von hochbeanspruchten Bauteilen großer Abmessungen mit ungleichartigen Schweißverbindungen
- BW W 31DT: Temperaturabhängiges Verhalten von hochbeanspruchten Bauteilen im Turbomaschinenbau mit ungleichartigen Nickelbasis-Schweißverbindungen
- BW L 32DT: Untersuchung des Tropfengrößeneinflusses auf Erosionsvorgänge
- BW W 32DT: Charakterisierung von Erosionsvorgängen
- BW L 33DT: Innovatives Diffusordesign unter beengten geometrischen Bedingungen
- BW W 33DT: Effizientere Diffusoren für Einsatz unter beengten geometrischen Bedingungen beim Retrofit von Niederdruckdampfturbinen
- BW L 34DT: Beeinflussung der Tropfenpopulation in Niederdruck-Dampfturbinen als innovativer Designansatz
- BW W 34DT: Messung und Simulation der Nassdampfströmung in Niederdruck-Dampfturbinen



Arbeitskreis Fluiddynamik und Dampfturbine

Projekt: BY 08DT

Numerische Simulation der Druckschwankungen in Laufrädern von großen Francis Turbinen im Teil- und Überlastbetrieb und ihre Auswirkungen auf die Dauerfestigkeit

Projektleiter:	Prof. DrIng. habil. Dr. h.c. Rudolf Schilling Lehrstuhl für Fluidmechanik Technische Universität München
Mitarbeiter:	M.Sc. Marcelo Magnoli
Finanzierung:	Voith Hydro Holding GmbH & Co. KG, Heidenheim
	Staatsministerien für Wissenschaft, Forschung und Kunst sowie für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie

1 Ausgangssituation

Wasserkraft ist eine der frühesten erneuerbaren Energiequellen, die kommerzielle Anwendung fanden, und bis heute macht sie einen wichtigen Teil der installierten Kraftwerksanlagen aus. Diese reichen von kleinen Wasserkraftanlagen mit weniger als 1 MW bis hin zu den größten Anlagen wie Itaipu, in Brasilien, und Drei-Schluchten, in China, mit Nennleistung von jeweils 14,0 GW und 18,2 GW und einer jährlichen Energieerzeugung im Jahr 2009 von jeweils 91,6 TWh und 79,4 TWh.

Mit der steigenden Nachfrage nach sauberen Energiequellen gewinnt die hydraulische Energie immer mehr an Bedeutung. In Anbetracht des derzeitigen Energiemarktes, auf dem auch andere erneuerbare Energiequellen wie Wind- und Solarenergie von steigenden Marktanteilen profitieren, bieten Wasserkraftwerke eine sehr attraktive Lösung für die Stabilisierung des elektrischen Netzes sowie für die Energiespeicherung. Die erzeugte Energie aus Wind- und Solaranlagen wird von Wetterbedingungen beeinflusst und manchmal produzieren sie mehr oder weniger Energie als benötigt. Infolgedessen entsteht eine starke dynamische Komponente im elektrischen Netz. Mit dem zunehmenden Einsatz dieser erneuerbaren Energiequellen sind auch deren negative Auswirkungen auf das Netz größer und dadurch steigt auch der Bedarf an Regelung und Energiespeicherung. Wasserturbinen können diesen dynamischen Regelungsbeitrag im elektrischen Netz effizienter und schneller als herkömmliche thermische Kraftwerke bereitstellen. Aufgrund dieses zunehmenden Bedarfs müssen Wasserturbinen eine noch höhere Flexibilität bieten.



Diese aktuelle Situation ist verantwortlich für neue Herausforderungen in der Auslegung von Wasserturbinen. Der Betriebsbereich von Wasserturbinen muss erweitert werden, um mehr Möglichkeiten bei der Netzregelung zur Verfügung zu stellen. Das bedeutet zum Beispiel, dass die Turbinen im größeren Bereich des Kennfeldes ohne langfristige auftauchende Schäden betrieben werden müssen. Die neuen Kundenanforderungen an moderne Wasserturbinen enthalten unter anderem deren Betrieb bei tiefer Teillast, manchmal sogar bei weniger als der Hälfte ihrer Nennleistung. Bei Teillast mit weniger als 60% des optimalen Volumenstroms können starke Druckschwankungen mit Amplituden von 5% bis zu 10% der nominalen Fallhöhe in der Maschine entstehen. Der Grund dafür ist normalerweise die Bildung eines Wirbelzopfes im Saugrohrkonus, dessen Druckschwankungen zu allen hydraulischen aktiven Teilen der Turbine verbreitet werden. In extremen aber nicht seltsamen Fällen können die Druckschwankungen die Turbinenstruktur beschädigen, vor allem das Laufrad. Dieses Problem wird von der in den letzten Jahrzehnten zunehmenden Leistungsdichte von Wasserturbinen nur noch verschärft.

Die häufigsten Lösungsvorschläge für das Druckschwankungsproblem in Wasserturbinen wirken sich eher negativ auf den Turbinenwirkungsgrad und basieren auf schwachem theoretischem Hintergrund. Ein umfangreicheres Verständnis über das dynamische Verhalten von Francis Turbinen bei stark instationären Betriebsbedingungen durch numerische Simulationen, wie von MAGNOLI und SCHILLING [23] vorgeschlagen, soll eine sichere mechanische Auslegung der Maschine ermöglichen. Dadurch kann die Turbinestruktur die starken Druckschwankungen unbeschadet überstehen.

2 Projektziele

Ziel des Projektes ist die Entwicklung der Werkzeuge, mit denen sich die instationären Strömungsphänomene und deren Wechselwirkung mit den Schaufeln genügend genau und mit einem für die Praxis vertretbaren Aufwand vorhersagen lassen. Ferner sollen die wesentlichen Einflussparameter hinsichtlich des Wirkungsgrades und der Lebensdauer einer Francis Turbine untersucht werden. Somit können sowohl präzise Vorhersagen über den Betriebsbereich einer Turbine getroffen werden als auch bei der Auslegung eine genaue Dimensionierung der Turbinenschaufeln vorgenommen werden. Dabei sollen diese komplexen Phänomene mit größtmöglicher Genauigkeit und vertretbarem Aufwand bereits im Auslegungsprozess vorhergesagt werden können. Mit Hilfe des entwickelten Verfahrens soll eine umfassende Analyse des Einflusses der Druckschwankungen auf die Dauerfestigkeit von Turbinenlaufrädern durchgeführt werden.

3 Vernetzung

Die Stromerzeugung aus Wasserkraft kann einen entscheidenden Beitrag zur Stabilisierung großer Verbundnetze und emissionsfreien, dezentralen Stromerzeugung leisten. Damit ergibt sich eine enge Verknüpfung mit anderen Teilprojekten von KW 21. Die in diesem Teilprojekt angestrebten Ergebnisse lassen sich möglicherweise auch bei anderen Maschinentypen, wie z.B. bei Gas- und Dampfturbinen zur Anwendung bringen.



4 Vorgehensweise und Methodik

Druckschwankungen, Strömungsinstabilitäten und Wirbelbildung sind häufige, aber unerwünschte, transiente Phänomene bei schnellläufigen Francis Turbinen. Die daraus resultierenden Druckschwankungen führen zu dynamischen Belastungen, welche in manchen Fällen Risse im Laufrad verursachen können [4, 8]. Die Vorhersage des dynamischen Druckfeldes in der Turbine ermöglicht die genaue Berechnung von Strukturspannungen im Laufrad sowie dessen Lebensdauer. Ziel ist es, Risse und Maschinenausfällen zu vermeiden.

Üblicherweise wird das dynamische Druckfeld beim Modellversuch nicht gemessen, weil die Messungen extrem zeitaufwendig und teuer sind und dafür komplexe experimentelle Einrichtung und Instrumenten benötigt werden [3]. Ein solches Messverfahren entspricht nicht der üblichen Vorgehensweise für normale Modellversuche und wurde bisher hauptsächlich im Rahmen von bestimmten Forschungsprojekten angewandt [11, 16]. Mit den heutigen verfügbaren Verfahren werden nur stationäre Berechnungen und Prototypenmesswerte eingesetzt, um das dynamische Druckfeld abzuschätzen [8, 10], welches für die Berechnung der dynamischen Strukturspannungen notwendig ist. In diesem Sinne stellen die systematische Berechnung der CFD-Ergebnisse als Eingabe für die Finite-Elemente-Analyse einen wesentlichen Fortschritt für die Berechnung der Lebensdauer von Laufrädern dar.

5 Projektergebnisse und Ausblick

5.1 Numerisches Modell

Der erste Schritt im Rahmen der numerischen Strömungssimulation war die Erzeugung des CFD-Modells der gesamten Maschine. Viele der instationären Effekte wie die Rotor-Stator-Interaktion und die Strömungsinstabilitäten im Saugrohrkonus entstehen aus der Interaktion zwischen verschiedenen Maschinenkomponenten, weshalb es nicht angemessen, ist nur einen Teil der Turbine zu modellieren. Darauffolgend wurden die Parameter des CFD-Modells durch den Vergleich von numerischen und experimentellen Ergebnissen optimiert. Berücksichtigt man die transienten Effekte in der numerischen Strömungssimulation, so gewinnt die Turbulenzmodellierung an Bedeutung und dadurch kann die Genauigkeit der Ergebnisse beeinflusst werden. Deswegen wurden die URANS, SAS [14] und DES [19] Turbulenzmodelle getestet.

Das numerische Modell soll das Maschinenverhalten am Versuchsstand so genau wie möglich wiedergeben. Aus diesem Grund wurden die Interpolationsverfahren und auch andere numerische Parameter mit den verfügbaren experimentellen Ergebnissen getestet. Die Genauigkeit des Modells wurde in Abhängigkeit von der gemessenen Fallhöhe, Volumenstrom, Moment und Wirkungsgrad bewertet. Dafür wurden fünf verschiedene Betriebspunkte auf dem Modellkennfeld ausgewählt: Optimum, Volllast, Normalbetrieb, Teillast bei hoher bzw. niedriger Fallhöhe. Die Berechnungen und die endgültigen Simulationen wurden mit dem kommerziellen Programm CFX von ANSYS und dem NS3D-Programm durchgeführt. Letzteres wurde am Lehrstuhl für Fluidmechanik der Technischen Universität München entwickelt.

Einfluss von Druckschwankungen auf die Dauerfestigkeit von Francis Turbinen



Der erste Schritt zur Vorbereitung des numerischen Modells entspricht der Netzgenerierung. Da sich ein wichtiger Teil der Druckschwankungen auf die Interaktion zwischen stehenden und drehenden Komponenten zurückführen lässt, wurde die gesamte Maschine simuliert und das numerische Gitter umfasste alle Maschinenkomponenten, d.h. Spirale, Traverse, Leitschaufel, Laufrad und Saugrohr. Die einzelnen Komponenten wurden separat vernetzt. Dabei wurden individuelle Vernetzungsstrategien verwendet und ausschließlich hexahedrische Zellen. Im Zuge der numerischen Simulation wurden sämtliche Komponenten zusammen mit "non-matching-interfaces" gekoppelt. Das Gitter für die gesamte Maschinensimulation beinhaltet mehr als sechs Millionen Zellen. Während die Traversen, Leitschaufeln und Laufrad mittels der IDS-Software vom FLM vernetzt wurden, erfolgte die Vernetzung der Spirale und des Saugrohrs mit Hilfe des kommerziellen Programms ICEM von ANSYS. In der Abbildung 1 werden ein Teil des numerischen Netzes sowie manche typische Simulationsergebnisse aufgeführt.



Abbildung 1: FV-Netz, Druckfeld und Stromlinien bei Volllast

Die numerischen Parameter wurden mit den einzelnen Komponenten getestet und dann für die Simulation der gesamten Maschine verwendet. Die Anzahl der Zellen wurde variiert, bis gitterunabhängige Ergebnisse und y+-Werte im logarithmischen Bereich zwischen 30 und 200 erreicht wurden. Bei der Spirale ging die Netzverfeinerung von ca. 500.000 bis 800.000 Zellen, bei einem einzigen Beschaufelungskanal, d.h. Traverse, Leitschaufel und Laufschaufel, von ca. 80.000 bis 300.000 Zellen und beim Saugrohr von ca. 270.000 bis 550.000 Zellen. Betrachtet man alle simulierten Betriebspunkte, so erreichten die Ergebnisse mit dem feinsten Netz eine maximale Abweichung von 1,6%, siehe Tabelle 1. Die maximale Abweichung mit dem gröbsten Netz lag hingegen bei 3,4%.

Es wurden auch verschiedene Interpolationsverfahren ausgewertet. Wie erwartet, erzielten die UDS und CDS Verfahren relativ ungenaue Geschwindigkeits- und Druckfelder sowie Abweichungen von bis zu 5,1% beim Wirkungsgrad. Die Verfahren zweiter Ordnung MINMOD und QUICK lieferten die genauesten Ergebnisse im Vergleich zu den Messwerten. Jedoch wies das erste Verfahren ein besseres Konvergenzverhalten auf. Die Ergebnisse in der Tabelle 1 wurden mittels MINMOD ermittelt.

Die Standardturbulenzmodelle k- ε , k- ε LCL, k- ω und k- ω SST wurden auch im Rahmen der stationären Simulationen untersucht. Die auf die turbulente Dissipationsgleichung basierten Modelle, d.h. k- ε und k- ε LCL, erzielten die besten Ergebnisse und die schnellste Konvergenz. Für die Berechnungen mit dem Turbulenzmodell k- ε LCL benötigte man über 30% mehr Zeit als unter Verwendung des k- ε Standardmodells, ohne jegliche Verbesse-



rung der Präzision. Obwohl die k- ω -Modelle Ergebnisse mit einer maximalen Abweichung von 3,0% lieferten, waren deren numerische Stabilität und Konvergenz etwa schlechter.

Bei den numerischen Tests wurde der vorgeschriebene Turbulenzgrad zwischen 1% und 10% variiert, denn man kann ihn experimentell nur schwer bestimmen. Nichtsdestotrotz war dessen Einfluss auf die Ergebnisse vernachlässigt, weil die Anlauflänge ca. 2,5-mal dem Spiraledurchmesser beträgt und die Turbulenzerzeugung in der Turbine sehr stark ist.

Neben dem Turbulenzgrad wurden die Randbedingungen am Eintritt der Spirale durch den vorgeschriebenen Volumenstrom ergänzt. Am Austritt wurde die Länge des numerischen Modells variiert, um Randeffekte und Ungenauigkeiten am Saugrohrauslass zu vermeiden. Dort spielen die Geschwindigkeits- und Druckfelder immer noch eine wichtige Rolle. Gemäß MAURI [13] wurde eine rechteckige Erweiterung des Austritts mit einem Umfang von einem drittel der entwickelten Saugrohrlänge angewandt und der Druck am Austritt wurde an einem Referenzwert fixiert.

		Modelly	/ersuch			Simu	lation		Abweichung			
Betriebs-	n_'/n_'	q_'/q_'	T_1'/T_1 opt	η/η_{opt}	n_'/n_'	q_'/q_'	T_1'/T_1 opt	η/η_{opt}	$\delta n_1^{'}$	δq_1	δT_1	δη
punkt	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Optimum	100,0	100,0	100,0	100,0	99,4	100,0	100,3	100,2	-0,6	-0,6	0,3	0,2
Volllast	110,3	111,5	108,3	97,2	109,6	111,5	110,0	98,7	-0,6	-0,6	1,6	1,5
Normal	107,0	103,0	102,2	99,3	106,0	103,0	102,4	99,4	-1,0	-1,0	0,2	0,1
H _{max}	107,8	73,9	69,3	93,8	106,7	73,9	69,3	93,8	-1,0	-1,0	0,0	0,0
H _{min}	119,9	70,8	64,4	91,0	119,0	70,8	65,1	91,9	-0,7	-0,7	1,0	1,0

Tabelle 1: Ergebnisse aus dem Modellversuch und aus der numerischen Simulation.

Die Tabelle 1 zeigt die Simulationsergebnisse auf, welche aus den beschriebenen numerischen Parametern resultieren. Die berechneten Werte von Fallhöhe, Volumenstrom, Moment und Wirkungsgrad wurden mit den experimentellen Werten aus dem Modellversuch durch die dimensionslosen Parameter: n'_1/n'____,q'_1/q'____,m',T'_____,trund \eta / \eta_{opt} verglichen. Mit einer maximalen Abweichung von lediglich 1,6% kann man das numerische Modell als präzise genug für weitere Simulationen bezüglich Druckschwankungen, Rotor-Stator-Interaktion, Wirbelbildung und dynamische Strömungseffekte betrachten.

Der Verlauf des Druckbeiwertes bei Volllast wurde mit Hilfe von NS3D und CFX berechnet. Zum Vergleichen dieser zwei numerischen Codes wurde C_p in der Abbildung 2 über die normierte Schaufellänge auf drei Konformebenen dargestellt. Die Abweichungen zwischen den beiden Codes waren minimal.





Abbildung 2: Verlauf des Druckbeiwertes, C_p, über die normierte Schaufellänge, s, auf drei Konformebenen, berechnet mit NS3D und CFX.

Für die instationären Strömungsberechnungen der gesamten Maschine wurden verschiedene Zeitschritte berücksichtigt. Die Empfindlichkeit der Ergebnisse gegenüber der Zeitschrittgröße wurde ebenso getestet. Das allgemeine Verhalten der Strömung durch die gesamte Turbine ließ sich schon mit der Anwendung von ca. 120 Zeitschritten pro Maschineumdrehung wiedergeben. Jedoch war eine detaillierte Darstellung der Rotor-Stator-Interaktion unter dieser Bedingung nicht möglich. Zur Bestimmung einer geeigneten zeitlichen Auflösung für die Interaktion zwischen den Leitschaufeln und dem Laufrad wurden ca. 400 Zeitschritte pro Maschineumdrehung verwendet. Dies entspricht ca. 30 Zeitschritten pro Laufschaufel und ca. 16 Zeitschritten pro Leitschaufel. Die Strömung durch alle Turbinekomponenten wurde erst nach mehr als 30 Maschinenumdrehungen stabil.

Die Zeitschrittgröße hatte einen direkten Einfluss auf die Gesamtdauer der numerischen Berechnungen. Einerseits impliziert ein kleiner Zeitschritt eine große Anzahl von Diskretisierungspunkten im Zeitverlauf, andererseits benötigt man wenigere Iterationen, um die Konvergenz für einen bestimmten Zeitschritt zu erreichen. Die Anwendung von ca. 400 Zeitschritten pro Maschineumdrehung erwies sich als ca. 8-mal schneller als die Verwendung von ca. 6.000 Zeitschritten und zweimal langsamer als die Verwendung von ca. 120 Zeitschritten. Bezüglich der Berechnungsgeschwindigkeit konnte 1,7 Maschineumdrehung pro Tag auf einem Linux-Cluster mit 8 Intel Q6600-Prozessoren, jedem mit 2,4 GHz, 4 Kernen und 2 GB Speicherkapazität, berechnet werden.

Auch der numerische Löser für die instationären Strömungsberechnungen wurde getestet. Wie bereits von FERZIGER und PERIĆ [7] beobachtet, beschleunigten Mehrgitterverfahren die numerische Lösung der transienten Simulationen nicht eindeutig. Das BCGSTAB-Lösungsverfahren bewies sich als genau so schnell wie das Mehrgitterverfahren. Außerdem bringt der Einsatz des BCGSTAB-Verfahrens noch den zusätzlichen Vorteil, dass keine künstlichen numerischen Schwankungen im berechneten Drucksignal eingesetzt wurden. Die ungenügende Stabilität des Mehrgitterverfahrens lässt sich möglicherweise auf die sehr unterschiedlichen Turbulenzmaßstäben zurückführen, welche bei der Simulation der gesamten Maschine mit Schaufelkanal und Saugrohr vorhanden sind. Der letzte Test zur Lösung der instationären Strömung beschäftigte sich mit der



Verwendung von doppelter bzw. einfacher Genauigkeit. Zwischen den Ergebnissen mit einfacher bzw. doppelter Genauigkeit konnte man keine Abweichung feststellen. Aus diesem Grund wurden die Simulationen mit der einfachen Genauigkeit fortgeführt, weil dies, wie erwartet, ungefähr doppelt so schnell als mit der doppelten Genauigkeit erfolgte.

5.2 Numerische Ergebnisse

Nach der sorgfältigen Verifizierung des numerischen Modells wurde der Schwerpunkt der Studie auf die Untersuchung der Druckschwankungen im Laufrad überführt. Diese werden hauptsächlich durch die Rotor-Stator-Interaktion, durch die instationären Strömungseffekte im Saugrohrkonus und durch die Wirbelbildung an der Laufradaustrittskante induziert. Hier wurde unter anderem der Effekt der auf URANS und LES basierten Turbulenzmodelle auf die Form der Wirbelstrukturen und auf die Amplitude der Druckschwankungen analysiert. Wie bereits diskutiert, wird die experimentelle Bestimmung des schwankenden Druckfeldes am Laufrad in der Regel nicht durchgeführt. Da dieser Effekt aber für die dynamische Belastung des Laufrads und für die damit verbundenen dynamischen Strukturspannungen verantwortlich ist, sollte man ihn in der instationären Strömungsberechnung berücksichtigen, um höhere Genauigkeit zu erzielen. Das während dieser Studie entwickelte CFD-Modell ermöglichte die numerische Berechung der instationären Strömungseffekte, wodurch das dynamische Druckfeld in der gesamten Maschine, auch im Laufrad, ermittelt werden konnte. Die Turbulenzmodellierung ist dazu bekannt, die instationären Eigenschaften der simulierten Strömung stark beeinflussen zu können. Daher wurden die mit URANS, SAS und DES berechneten Ergebnisse miteinander verglichen.

In Abbildung 3 sieht man, dass die Druckschwankungen am Laufrad bei Volllast von der Rotor-Stator-Interaktion dominiert werden. Dies erfolgt aufgrund der kinematischen Interaktion zwischen den drehenden Laufschaufeln und den stehenden Leitschaufeln, Traversen und Spirale.

Der instationäre Druck an der Laufradeintrittskante nahe Kranz und dessen Fourier-Transformation bei Volllast werden als Beispiel in der Abbildung 4 aufgezeigt. Sowohl der Durchlauf der einzelnen Laufschaufeln an den 24 Leitschaufeln als auch der Effekt der ungleichmäßigen Druckverteilung in der Spirale können im instationären Drucksignal erkannt werden. Dieser Effekt wird von den lokalen Maxima in der Fourier-Transformation bei 1- und 24-mal der Umdrehungsfrequenz der Maschine widerspiegelt. Es stellt sich fest, dass sich die Druckschwankungen nahe Boden wegen der mechanischen Auslegung der Maschine und deren spezifischen Drehzahl hauptsächlich auf die Interaktion zwischen dem Laufrad und der ungleichmäßigen Druckverteilung in der Spirale zurückführen lassen. Nahe Kranz werden Druckschwankungen vor allem durch die Interaktion zwischen den Laufschaufeln und den Leitschaufeln hervorgerufen. Grund dafür ist der kleine Abstand zwischen Lauf- und Leitschaufeln in diesem Bereich.





Abbildung 3: Amplitude der Druckschwankungen bei Volllast, auf drei Konformebenen v =0,20, v = 0,50 und v = 0,80.



Abbildung 4: Amplitude der Druckschwankungen an Laufradeintrittskante nahe Kranz und deren Fourier-Transformation.

Die allgemeine Amplitude der Druckschwankungen auf der Schaufeloberfläche kann aus der Abbildung **5 und der Abbildung 6 entnommen werden. Im größten Bereich der Schau**fel betrug die Amplitude der Druckschwankungen bei Volllast Werte zwischen 0,3% und 2,1% der Fallhöhe. Nur an der Eintrittskante nahe Kranz erreichte sie einen Wert von 12,4%. Diese typische Größenordnung wurde auch von AVELLAN et. al. [3] und FAHRAT et. al. [5] gemessen. Die Amplitude der Druckschwankung erreicht höhere Werte, wenn sie sich auf den stationären Druck und nicht auf die Fallhöhe bezieht. Diese Werte bewegen sich zwischen 0,8% to 51,4% und liegen um 10,0% im größeren Teil der Schaufeloberfläche. Diese Werte sind wichtig, weil der stationäre Druck und die Amplitude der instationären Druckschwankungen jeweils für die statischen und dynamischen Belastungen der Struktur verantwortlich sind.





Abbildung 5: Amplitude der Druckschwankungen bei Volllast, entlang der Schaufellänge, u, auf ausgewählten Konformebenen, v.







Der Wirbel im Saugrohrkonus stellt ein weiteres instationäres Strömungsphänomen dar, welches durch die Strömungsinstabilität bei Teillast erzeugt wird. Solche dynamische Strömungsphänomene können nur unter dem Einsatz der SAS und DES Turbulenzmodelle erfasst werden. URANS erwies sich zu diesem Zwecke als ungeeignet. Dieser bereits erwartete Mangel von URANS bei den transienten Simulationen lässt sich durch die übermäßige Dämpfung erklären, welche von der einfachen Mittelung der Navier-Stokes Gleichungen verursacht wird. Bei dem untersuchten Problem kam der Wirbelzopf im Saugrohrkonus mit dem Einsatz von URANS gar nicht zustande.

Die Abbildung 7 vergleicht den Wirbelzopf, welcher mit dem SAS-Turbulenzmodell simuliert wurde, und den im Modellversuch beobachteten Wirbel. In Abbildung 8 wurde jeweils die mit URANS und SAS berechnete Amplitude der Druckschwankungen gegenübergestellt.

Die Amplitude der Druckschwankungen im Saugrohrkonus nahm bei der numerischen Simulation Werte zwischen 8.6% und 13.1% an und verdeutlicht die Präzision des CFD-Modells im Vergleich zum Modellversuch. Die experimentellen Werte lagen zwischen 9.0% und 13.5%. Da der Wirbelzopf im Saugrohr der wichtigste instationäre Effekt bei Teillast ist und dieser mit URANS nicht erfasst werden kann, gaben die mit diesem Modell berechneten Amplituden nur den Einfluss der Rotor-Stator-Interaktion wieder. Deswegen waren die simulierten Amplituden dementsprechend klein, sie lagen nämlich zwischen 0,1% und 1,2% der Fallhöhe im größten Teil der Schaufel und bei 3,9% an der Eintrittskante nahe Kranz. Anderseits konnten die hybriden Turbulenzmodelle, wie bspw. SAS, Werte der aleichen Größenordnung wie bei FARHAT. AVELLAN und SEIDEL [6] annehmen, d.h. Werte von 0,6% bis zu 5.0% der Fallhöhe. In diesem Fall wurden hohe Werte für die Amplitude der Druckschwankungen in einem großen Teil der Schaufeloberfläche, insbesondere auf der Saugseite, berechnet. Grund dafür ist die relative Position der Saugseite der Laufschaufeln bezüglich des Saugrohrwirbels und die Nähe zum Saugrohrkonus. Auch wenn die Amplituden der Druckschwankungen bei Teillast höher als bei Volllast waren, sollte man beachten, dass extremer Teillastbetrieb nicht so häufig vorkommt wie der Betrieb bei Optimum und bei Volllast.



Abbildung 7: Wirbelzopf bei Teillast und niedriger Fallhöhe: Modellversuch, simuliert mit SAS.




Abbildung 8: Amplitude der Druckschwankung bei Teillast, entlang der Schaufellänge, u, auf ausgewählten Konformebenen, v.

Der letzte untersuchte instationäre Effekt war die Wirbelbildung an der Laufradaustrittskante. Dieses Phänomen gehört zur sekundären Strömung und lässt sich in den numerischen Simulationen daher nur schwer identifizieren. Trotzdem konnten die dadurch verursachten Druckschwankungen an der Austrittskante der Laufschaufeln bestimmt werden. Diese werden in der Abbildung 9 und der Abbildung 10 aufgezeigt. Die Amplitude der Druckschwankungen betrug 0,9% bis 3,7% der Fallhöhe und darf nicht vernachlässigt werden. Diese Werte sind teilweise höher als die allgemeine Druckschwankung auf dem größten Teil der Schaufel bei Volllast und fast so hoch wie die berechneten Amplituden bei Teillast. Auch wenn diese Wirbeln sich auf einen begrenzten Bereich der Laufschaufeln beschränken, befinden sie sich genau an der Stelle, wo die Struktur am schwächsten ist, und können eventuell auch Eigenformen der Laufschaufeln erregen [8]. Die Wirbelbildung an der Austrittskante erfolgt bei Volllast und in der Nähe vom Optimum und kommt öfters vor als bspw. manche Teillasteffekte. Die Wirbelbildung ist entlang der Austrittskante nicht synchron, möglicherweise weil die lokalen Strömungseigenschaften wie Dicke der Grenzschicht, Ausströmungswinkel und Ausströmungsgeschwindigkeit am Boden und am Kranz sehr unterschiedlich sind. Die Frequenzen spannten sich von ca. 150-mal der Drehfrequenz entlang der unteren Hälfte der Schaufel bis ca. 90-mal der Drehfrequenz entlang dem oberen dritten Teil der Schaufel. Im Gegensatz zu der Rotor-Stator-Interaktion und ähnlich wie bei den Instabilitäten im Saugrohr wurde die simulierte Wirbelbildung stark durch das Turbulenzmodell beeinflusst, wie in der Abbildung 11 dargestellt wird. Das Turbulenzmodell URANS lieferte kleine unrealistische Amplituden im Vergleich zu SAS und DES. Neben der von der Theorie erwarteten höheren theoretischen Genauigkeit baten die DES und SAS Simulationen die beste Übereinstimmung mit den experimentellen Beobachtungen, wie in der Abbildung 12 ersichtlich ist.





Abbildung 9: Amplitude der Druckschwankungen bei Volllast als Folge der Wirbelbildung an der Laufradaustrittskante und deren Fourier-Transformation.



Abbildung 10: Amplitude der Druckschwankungen bei Volllast als Folge der Wirbelbildung an der Laufradaustrittskante, Meridianansicht.



Abbildung 11: Amplitude der Druckschwankungen bei Volllast als Folge der Wirbelbildung an der Laufradaustrittskante, auf der Druck- und Saugseite, berechnet mit verschiedenen Turbulenzmodellen.





Abbildung 12: Wirbelbildung an der Laufradaustrittskante: Modellversuch und mit SAS simuliert.

Die Ergebnisse aus der transienten Strömungsberechnung dienten als Startpunkt für die Finite-Elemente-Analyse des Laufrads. Tabelle 2, nach MAGNOLI und SCHILLING [23], zeigt die dynamischen mechanischen Spannungen im Laufrad für verschiedene Betriebspunkte.

	Amplitude der Druckschwankungen		Maximale dynamische Spannung
Betriebspunkt _	ΔP / (ρgH)		- /-
	Eintrittskante	Schaufel	O _{e,a,max} / O _{e,m,max}
	(%)	(%)	(-)
Volllast	13,7	2,7	0,04
Teillast	8,6	6,0	0,15
Tiefe Teillast	14,5*	7,7*	0,25

Tabelle 2: Dynamische mechanische Spannungen aus der transienten Strukturberechnung.

5.3 Zusammenfassung

Die instationäre Strömungssimulation der gesamten Turbine ermöglicht die Vorhersage des schwingenden Druckfeldes bei schnellläufigen Francis Turbinen. Die Druckschwankungen sind die Ursache der Strukturspannungen, welche zu mechanischen Schäden im Laufrad führen können. Daher kann die numerische Simulation von den Druckschwankungen genauere Strukturanalysen und verbesserte Vorhersagen über die dynamischen Belastungen und über die Lebensdauer des Laufrads bieten. Die mit NS3D ebenso wie die mit CFX durchgeführten Strömungsberechnungen zeigten eine sehr gute Übereinstimmung mit den verfügbaren experimentellen Ergebnissen. Wie erwartet, wirkten sich die verschiedenen Turbulenzmodelle sehr unterschiedlich auf die numerischen Ergebnisse aus. Auch wenn alle getesteten Turbulenzmodelle, d.h. URANS, SAS und DES, die dynamischen Eigenschaften der Strömung bei Volllast wiedergeben konnten, konnten nur SAS und DES den Wirbelzopf im Saugrohrkonus bei Teillast erfassen. Die Druckschwankun-



gen durch die Wirbelbildung an der Laufradaustrittskante konnten mit allen Turbulenzmodellen erkannt werden, jedoch waren nur SAS und DES in der Lage, die korrekte Wirbelbildung und Amplitude der Druckschwankungen zu simulieren.

5.4 Ausblick

Die ausgewerteten Ergebnisse aus der Struktursimulation können in Hinblick auf die Lebensdauer des Laufrads verwendet werden. Außerdem kann der Einfluss der einzelnen Betriebsbedingungen auf die Lebensdauer des Laufrads untersucht werden. Damit ist man in der Lage, präzise Vorhersagen über den Betriebsbereich schnellläufiger Francis Turbinen zu treffen.

5.5 Literatur

- [1] Antonsen, Ø. Ustabile driftsområder for Francisturbiner. Tech. rep., Norges Teknisk- Naturvitenskaplige Universitet, Trondheim, Norway, 2005.
- [2] Ausoni, P. Etude du mécanisme de génération des tourbillons de von Kármán et de leurs interactions avec la structure. Tech. rep., Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland, 2004.
- [3] Avellan, F., Etter, S., Gummer, J. H., and Seidel, U. Dynamic Pressure Measurements on a Model Turbine Runner and their Use in preventing Runner Fatigue Failure. In Proceedings of the 20th IAHR Symposium (Charlotte, North Carolina, USA, 2000).
- [4] Coutu, A., Proulx, D., Coulson, S., and Demers, A. Dynamic Assessment of Hydraulic Turbines. In Proceedings of HydroVision 2004 (Montreal, Quebec, Canada, 2004).
- [5] Farhat M., Natal S., Avellan F., Paquet F., Lowys Py. Couston M.: Onboard measurements of pressure and strain fluctuations in a model of low head francis turbine, Proceedings of the XXIst IAHR Symposium of Hydraulic Machinery and Systems, 2002
- [6] Farhat, M., Avellan, F., and Seidel, U. Pressure Fluctuation Measurements in Hydro Turbine Models. In Proceedings of the 9th Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (Honolulu, Hawaii, USA, 2002).
- [7] Ferziger, J. H., and Perić, M. Computational Methods for Fluid Dynamics, 3rd ed. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2002.
- [8] Fischer, R., Seidel, U., Grosse, G., Gfeller, W., and Klinger, R. A Case Study in Resonant Hydroelastic Vibration: The Causes of Runner Cracks and the Solutions Implemented for the Xiaolangdi Hydroelectric Project. In Proceedings of the 21st IAHR Symposium (Lausanne, Switzerland, 2002).
- [9] Harten, A. High resolution schemes for hyperbolic conservation laws. Journal of Computational Physics 49, 3 (1983), 357–393.
- [10] Huth, H. J. Fatigue Design of Hydraulic Turbine Runners. PhD thesis, Norges Teknisk- Naturvitenskaplige Universitet, Trondheim, Norway, 2005.



- [11] Kuntz, M., Garcin, H., Guedes, A., Menter, F., Parkinson, E., and Kueny, J. L. Developments of CFX-TASCflow for unsteady rotor-stator simulations in the frame of the European project HPNURSA. In CFX Users Conference 2000 (Munich, Germany, 2000).
- [12] Lien, F. S., Chen, W. L., and Leschziner, M. A. Low-Reynolds-number eddyviscosity modelling based on non-linear stress-strain/vorticity relations. In Proceedings of the 3rd Int. Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Experiments, Crete, Greece (Amsterdam, Netherlands, 1996), W. Rodi, Ed., Elsevier, pp. 91–100.
- [13] Mauri, S. Numerical Simulation and Flow Analysis of an Elbow Diffuser. PhD thesis, Ecole Polytechnique F´ed´erale de Lausanne, Lausanne, Switzerland, 2002.
- [14] Menter, F. R., and Egorov, Y. A Scale-Adaptive Simulation Model using Two-Equation Models. Tech. Rep. 2005-1095, AIAA, Reno, Nevada, USA, 2005.
- [15] Menter, F. R., Kuntz, M.: Development and application of a zonal DES turbulence model for CFX-5, ANSYS CFX Validation Report, 2004
- [16] Nennemann, B., Vu, T. C., and Farhat, M. CFD prediction of unsteady wicket gate-runner interaction in Francis turbines: A new standard hydraulic design procedure. In Waterpower XIV (Austin, Texas, USA, 2005).
- [17] Ruprecht, A., Kirschner, O., Lippold, F., and Bunti'c, I. Noise reduction in a small Francis turbine caused by vortex shedding at the trailing edge, numerical analysis and field test. In IAHR 11th International Meeting of the Work Group on the behaviour of hydraulic machinery under steady oscillatory conditions (Stuttgart, Germany, 2003).
- [18] Spalart, P. R., Jou, W. H., Strelets, M., Allmaras, S. R.: Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach, 1st AFOSR Int. Conf. on DNS/LES, Aug. 4-8, 1997, Ruston, LA. In: Advances on DNS/LES, C. Liu and Z. Liu Eds., Greyden Press, Columbus, OH, USA
- [19] Strelets, M. Detached Eddy Simulation of Massively Separated Flows. In 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (Reno, Nevada, USA, 2001), no. 2001-0879, AIAA.
- [20] Wunderer R.; Schilling R.: Numerical simulation of active flow control in hydro turbines, The 12th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, 2008

6 Wesentliche terminliche und inhaltliche Abweichungen zum Projektantrag

Das Teilprojekt wurde Ende März 2011 fertig gestellt.



7 Publikationen und Patente

7.1 Im Rahmen des Projektes entstandene Publikationen

7.1.1. Begutachtete Publikationen

- [21] Magnoli M.; Schilling R.: Increase of the annual energy output in hydraulic powerplants through active flow control, The 11th International Conference on Renewable Energies and Power Quality, 2011
- [22] Magnoli M., Schilling R.: Active Flow Control in Francis Turbines, In Proceedings of HYDRO 2011 (Prag, Tschechien, 2011).
- [23] Magnoli M., Schilling R.: Numerical Simulation of Pressure Pulsations in Francis Turbines, In Proceedings of the 25th IAHR Symposium (Beijing, China, 2012).
- [24] Magnoli M., Schilling R.: Numerical Simulation of Pressure Pulsations in Francis Turbines, In Proceedings of SymHydro 2012 (Nizza, Frankreich, 2012).

7.1.2 Nicht-begutachtete Publikationen

[25] Magnoli M.: Numeric simulation of pressure oscillations in Francis turbine runners, JASS 2009 - Joint Advanced Student School. St. Petersburg, Russland, 2009

7.2 Weitere Publikationen

7.2.1 Begutachtete Publikationen

[26] Magnoli M., Schilling R.: Vortex Shedding in Francis Runners Trailing Edges, In Proceedings of the 24th IAHR Symposium (Iguaçu, Brasilien, 2008).

7.2.2 Nicht-begutachtete Publikationen

- [27] Schilling R.: Numerische Strömungsanalysen in Wasserturbinen, 2. Kolloquium Fluidenergiemaschinen, Institut f
 ür Strömungsmechanik und Technische Akustik, TU Berlin, 2010
- [28] Schilling R.: Möglichkeiten und Grenzen der numerischen Simulation bei der Weiterentwicklung von Wasserkraftmaschinen, Praktikerkonferenz Wasserkraft, Graz, Österreich, 2011.

8 Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses

8.1 Promotionen

M. Magnoli Numerische Simulation der Druckschwankungen in Laufrädern von großen Francis Turbinen im Teil- und Überlastbetrieb und ihre Auswirkungen auf die Dauerfestigkeit



Fluiddynamik und Dampfturbine

Projekt: BY 09DT

Rotordynamische Eigenschaften von Bürstendichtungen

Projektleiter:	Prof. DrIng. Hartmut Spliethoff Lehrstuhl für Energiesysteme Technische Universität München
Mitarbeiter:	Dr. Alexander O. Pugachev
	Dipl. Ing. Manuel Gaszner
Finanzierung:	Firma Alstom POWER
	Ministerien für Wissenschaft, Forschung und Kunst sowie für Wirtschaft, Infrastruktur und Verkehr

1 Ausgangssituation

Spaltverluste stellen in Dampfturbinen einen bedeutenden Anteil an den Gesamtverlusten dar. Abbildung 1 gibt einen Überblick über die lokale Einordnung von Spaltverlusten an einer Dampfturbine sowie deren Anteil an den Gesamtverlusten.



Abbildung 1: Lokale Einordnung und Aufteilung von Verlusten [5]

Spaltverluste treten an Wellendichtungen wie auch bei einflutigen Maschinen am Schubausgleichskolben in Form von Leckagen in die Umgebung auf. Auch innerhalb der Turbine kann durch Spaltverluste das Enthalpiegefälle der einzelnen Stufen nicht vollständig genutzt werden. Ein Teil des Dampfmassenstroms überbrückt die betreffende Turbinenstufe durch die Spaltgeometrie zwischen Läufer und Gehäuse und reduziert durch Fehlanströmung beim Wiedereintritt den Wirkungsgrad der darauffolgenden Stufe. Spaltver-



luste können je nach Baugröße, Arbeitsverfahren und Entwicklungsstand über 30 Prozent der Gesamtverluste einer Dampfturbine verursachen [5]. Bei Neuentwicklungen wie auch im Retrofitbereich besteht daher noch großes Potential zur Effizienzsteigerung durch moderne Dichtungssysteme.

1.1 Dichtungssysteme an Dampfturbinen

Grundsätzlich wird bei Dichtungen im Turbomaschinenbereich zwischen berührenden und kontaktlosen Dichtungen entschieden. Zu Letzteren zählen Labyrinthdichtungen, welche die größte Verbreitung im Turbomaschinenbereich finden. Diese müssen jedoch aufgrund ihrer Empfindlichkeit gegenüber Anstreifvorgängen mit einer Mindestspaltweite ausgestattet werden, welche die Dichtwirkung limitiert. Die rotordynamischen Eigenschaften von Labyrinthdichtungen wurden in der Vergangenheit bereits ausgiebig untersucht [7-9]. Eine weitere Dichtungsart, die berührungslos wie auch als Kontaktdichtung ausgelegt werden kann, ist die Bürstendichtung. Sie besteht aus einem Borstenpaket, das zwischen einer Front- und einer Rückplatte montiert ist. Der Borstendurchmesser beträgt zwischen 0.07 und 0.15 mm (siehe Abbildung 4). Die Leckagereduktion gegenüber einer Labyrinthdichtung beträgt bis zu 80 Prozent [5, 9]. Bislang existieren nur wenige Arbeiten über die rotordynamischen Eigenschaften von Bürstendichtungen [10, 11].

1.2 Die Versuchsumgebung am Lehrstuhl für Energiesysteme

Am Lehrstuhl für Energiesysteme werden zwei unabhängige Experimente zur rotordynamischen Charakterisierung von Gasdichtungen durchgeführt. Die zugehörigen Versuchsanlagen wurden im Zuge des vorliegenden Projektes umfassend modernisiert. Beide Versuche unterscheiden sich durch die Art des Rotorsystems, die Berechnungsmethode der Koeffizienten sowie durch den abzubildenden Bereich der Betriebsparameter. Den folgenden Experimenten und Berechnungen liegt ein lineares Modell gemäß Formel (1) zur Abbildung der charakteristischen Steifigkeits- und Dämpfungskoeffizienten eines Rotorsystems in radialer und tangentialer Richtung zu Grunde.

$$F_r/e = -K - c\Omega$$

$$F_t/e = k - C\Omega$$
1

1.3 Das statische Experiment zur Bestimmung der lokalen Koeffizienten

Der statische Versuch ermöglicht die Bestimmung der Steifigkeitskoeffizienten in den Zwischenkammern einer Dichtungskonstellation, auch lokale Koeffizienten genannt. Der Begriff "statisch" umschreibt hier die Charakteristik des Rotorsystems, das durch einen sehr kurz gewählten Lagerabstand und die Verwendung von sehr steifen Präzisionsspindellagern als starr betrachtet werden kann (siehe Abbildung 2). Dadurch können Vibrationen während des Experiments vernachlässigt werden, Formel (1) kann dadurch auf die Steifigkeitstherme reduziert werden (Formel 2). Die lokalen Koeffizienten basieren also auf auslenkungsproportionalen Kräften in radialer und tangentialer Richtung.

$$F_r/e = -K^{\text{lokal}}$$

$$F_t/e = k^{\text{lokal}}$$



3

Rotordynamische Eigenschaften von Bürstendichtungen

Die Hauptsteifigkeit wirkt in radialer Richtung und beeinflusst die Eigenfrequenz des Systems. Eine Erhöhung der Hauptsteifigkeit bewirkt eine Anhebung der Eigenfrequenz und umgekehrt. Die Nebensteifigkeit ist tangential gerichtet, führt also zu einer zunehmenden Amplitude der Auslenkung und fällt daher bei der Beurteilung der Systemstabilität mehr ins Gewicht als die Hauptsteifigkeit. Beim statischen Versuch werden die lokalen Koeffizienten durch die Bestimmung der Auslenkungsproportionalen Kräfte bei unterschiedlichen Rotorpositionen bestimmt. Die Kräfteberechnung erfolgt durch die Integration der Umfangruckverteilung in den beiden Dichtkammern gemäß Formel (3).

$$F_r = F_r^1 + F_r^2 = -R \int_0^{2p} p^1 \cos j \, dj - R \int_0^{2p} p^2 \cos j \, dj$$

$$F_t = F_t^1 + F_t^2 = -R \int_0^{2p} p^1 \sin j \, dj - R \int_0^{2p} p^2 \sin j \, dj$$



Abbildung 2: Statisches Messprinzip zur Bestimmung der lokalen Koeffizienten

Die Erfassung der Umfangsdruckverteilung erfolgt durch 10 Messpositionen pro Ebene (siehe Abbildung 2). Der Druckverlauf in axialer Richtung wird beim statischen Experiment als konstant angenommen, es werden für die Kräfteberechnung nur die beiden Druckmessebenen zwischen den Dichtungen in Betracht gezogen.

1.4 Das dynamische Experiment zur Ermittlung der globalen Koeffizienten

Beim dynamischen Experiment erfolgt die Bestimmung der dichtungsspezifischen rotordynamischen Parameter durch die Verwendung eines Magnetlagers. Durch die Verwendung eines Rotorsystems mit Schwingungsanregung ermöglicht der dynamische Versuch zusätzlich die Ermittlung der Dämpfung gemäß Formel (1).

Die Versuchsumgebung entspricht hier dem statischen Experiment, allenfalls das Rotorsystem wird durch einen gleitgelagerten, biegeweichen Rotor mit einer magnetischen Anregungsvorrichtung ersetzt (siehe Abbildung 3). Bei der Versuchsdurchführung erfolgt an jedem einzelnen Messpunkt eine Anregung des Rotorsystems an die Stabilitätsgrenze jeweils in Gleich- und Gegenlauf. Die hierfür notwendigen Magnetlagerparameter sowie die Eigenfrequenz werden messtechnisch erfasst. Die Anregung des Systems sowie die Richtung der Schwingung wird durch die Magnetlagerquersteifigkeit q eingestellt (siehe Abbildung 3, "Aufbau Magnetlager").



Die Eigenfrequenz des Systems kann durch die Magnetlagerhauptsteifikeit r angepasst werden. Durch die Differenz der Magnetlagerparameter q und r zwischen durchströmtem und undurchströmtem System wird der Einfluss des Dichtungssystems auf Steifigkeitsund Dämpfungseigenschaften bestimmt. Gleichzeitig werden Einflüsse der Gleitlager und der Rotorgeometrie ausgeschlossen. Zur Erhöhung der Messgenauigkeit wird jeder Messpunkt neben der Anregung in Gleich- und Gegenlauf zusätzlich bei mindestens drei unterschiedlichen Lagerabständen durchgeführt.





2 Projektziele

Dampfturbinen weisen heute einen weltweiten Anteil von über 70 % der weltweiten Stromerzeugung auf. Je nach Ausführung machen Spaltverluste bis zu 30% der Verluste einer Dampfturbine aus. Eine Reduktion der Spaltverluste durch den Einsatz moderner Konzepte wie Bürstendichtungen hat also ein hohes Potential, Ressourcen einzusparen und Emissionen zu senken. Hier ist ein Einsatz im Retrofitbereich ebenso denkbar wie bei der Entwicklung neuer Maschinen.

Das unbestrittene Potential der Bürstendichtung zur Leckagereduktion kann allerdings erst nach der genauen Kenntnis der rotordynamischen Eigenschaften derartiger Dichtsysteme ausgeschöpft werden. Im Vordergrund steht hier die Dampfanfachung, welche in Abhängigkeit von Betriebsparametern wie Geschwindigkeit und Richtung der Anströmung sowie dem Druckgefälle über der Dichtung, Einfluss auf den Schwingungshaushalt einer Turbomaschine hat. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit neben dem Einfluss der Dichtungsart und -geometrie auch der Einfluss der Betriebsparameter auf die Rotordynamik beleuchtet. Die Eigenschaften hinsichtlich Rotordynamik und Dichtwirkung unterschiedlicher Dichtungen wurden durch zwei unabhängige Experimente ermittelt und zur Erweiterung des Vergleichsspektrums mit Ergebnissen aus KW21 Phase I verglichen. Des Weiteren wurden Temperaturmessungen in der Kontaktzone des Borstenpaketes sowie Experimente zu Spiralschwingungen durchgeführt.

Die gewonnene Erkenntnis soll einen Beitrag zum betriebssicheren Einsatz von Bürstendichtungen in Dampfturbinen leisten. Ein flächendeckender Einsatz dieser überlegenen Dichtung hat großes Potential zur Wirkungsgradsteigerung für eine nachhaltige Energiewandlung in thermischen Kraftwerksprozessen.



2.1 Umsetzung der Hinweise aus den bisherigen Begutachtungen

Die bisherigen Gutachten ergaben keine zusätzlichen zu beachtenden Hinweise über die Projektabläufe.

3 Vernetzung

3.1 Vernetzung innerhalb KW21

Aufgrund der sehr spezifischen Problemstellung des Teilprojektes BY 09DT war eine direkte Vernetzung innerhalb der KW 21 Projekte nicht möglich.

Es bestand jedoch zu jeder Zeit eine enge Zusammenarbeit mit dem Industriepartner Alstom. In regelmäßig wiederkehrenden Projekttreffen wurden Ergebnisse ebenso wie auftauchende Probleme diskutiert. Ideen von Seiten des Industriepartners zum Design der zu untersuchenden Dichtungen sowie zur Durchführung der Experimente und der wichtigen Betriebsparameter flossen direkt in die Arbeit ein. Auch bei der Interpretation der Ergebnisse sowie der Versuchsplanung erfolgte ein wertvoller Erkenntnisaustausch.

3.2 Vernetzung außerhalb KW21

In der Modernisierungsphase der Versuchsanlage, insbesondere des Magnetlagerprüfstandes, bestand eine Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für angewandte Mechanik der TUM.

Im Zuge der Bereitstellung von Bürstendichtungen für die experimentellen Untersuchungen wurde der Kontakt zur Cross Manufacturing Ltd sowie der MTU Aero Engines GmbH geknüpft. Bei beiden Unternehmen handelt es sich um Hersteller von Bürstendichtungen.

4 Vorgehensweise und Methodik

Um den Einfluss von Bürstendichtungen auf die Rotordynamik einer Dampfturbine zu untersuchen, wurden unterschiedliche Dichtungsdesigns ausgewählt und unter einer gezielten Variation der Betriebsbedingungen mittels zwei unabhängigen Experimenten sowie durch Simulationen verglichen.

4.1 Untersuchte Dichtungskonstellationen

Aufgrund der weiten Verbreitung dieses Dichtkonzepts wurde ein Volllabyrinth als Referenzdichtung für alle weiterhin untersuchten Dichtungssysteme gewählt. Zwei verschiedene Designs von Bürstendichtungen würden jeweils in Kombination mit zwei Labyrinthspitzen untersucht. Diese Anordnung findet in der Praxis weite Verbreitung, dem Labyrinth kommt hier lediglich eine Sicherungsfunktion im Versagensfall der Bürstendichtung zu. Die getesteten Bürstendichtungen unterscheiden sich durch das Fertigungskonzept des Borstenpaketes sowie durch die Gehäusebauart. Die Benennung erfolgte gemäß der Anordnung der Dichtspitzen bzw. der Bürstendichtungen in Strömungsrichtung.



$(SSS = \underline{S}pitze - \underline{S}pitze - \underline{S}pitze, SSB = \underline{S}pitze - \underline{S}pitze - \underline{B}ürste)$



Abbildung 4: Untersuchte Dichtungskonstellationen (KW 21 Phase I + II)

Durch den Abgleich der aktuellen Messergebnisse mit Resultaten aus KW 21 Phase I (SSS-2, SSB-3) konnten weitere Erkenntnisse gewonnen werden. Diese umfassen den Einfluss der Spaltweite bei Labyrinthen wie auch die Untersuchung anderer Borstendurchmesser bei Bürstendichtungen.

4.2 Experimentelle und theoretische Untersuchungen

Die rotordynamische Untersuchung der Bürstendichtungen erfolgte experimentell und durch Simulationen. Es wurden zwei unabhängige Experimente durchgeführt, der statische Versuch zur Bestimmung der lokalen Koeffizienten sowie der dynamische Versuch zur Identifikation der globalen Koeffizienten. Darüber hinaus wurde die Leckage der unterschiedlichen Dichtungsdesigns unter variierten Betriebsbedingungen untersucht. Die Ergebnisse werden jeweils durch CFD Simulationen ergänzt. Hierfür werden die Modelle an einem Betriebspunkt durch Ergebnisse aus den Experimenten kalibriert und dann Berechnungen für andere Parameter durchgeführt. Der Vorteil liegt in einem wesentlich breiteren Spektrum an möglichen Versuchsparametern, die bei den Experimenten teilweise stark begrenzt sind. Die experimentellen Ergebnisse werden zudem mit Resultaten aus dem vorangegangenen KW 21 Phase I Projekt verglichen.



5 Projektergebnisse und Ausblick

Die in 4.1 vorgestellten Dichtungen wurden experimentell sowie theoretisch auf Leckage sowie rotordynamische Eigenschaften untersucht. Darüber hinaus erfolgte bei den Bürstendichtungen eine Temperaturmessung in der Kontaktzone, um einen Einfluss der Betriebsparameter auf die Reibleistung zwischen Rotor und Stator zu identifizieren.

5.1 Experimentelle Ergebnisse

Bei Experimenten mit Kontaktdichtungen (SSB-1, SSB-2) erfolgte vor den eigentlichen Experimenten eine sechsstündige Einlaufphase, in der die Dichtung unter konstanten Betriebsbedingungen betrieben wurde. Während dieser Phase erfolgten eine Glättung von Rauigkeiten auf der Schnittfläche der Borsten sowie eine endgültige Ausrichtung des Borstenpaketes in Legerichtung. Hierdurch wurde ein konstantes Betriebsverhalten der Dichtungen über die Dauer der Messungen gewährleistet.

5.1.1 Leckageuntersuchungen

Abbildung 5 zeigt die Leckagemassenströme sowie die effektive Spaltweite der untersuchten Dichtungen (4), aufgetragen über das Verhältnis zwischen Ein- und Austrittsdruck. Die effektive Spaltweite ermöglicht aufgrund der Unabhängigkeit von der Rotorgeometrie einen direkten Vergleich der aktuellen Daten zu Ergebnissen aus KW 21 Phase 1 [8, 11].





Abbildung 5: Leckagewerte und effektive Spaltweite der untersuchten Dichtungen

4



Die Daten aus KW21 Phase I wurden mit einem geringfügig größeren Rotordurchmesser ermittelt (siehe Abbildung 4). Darüber hinaus ist so eine Aussage zum Blow-Down Verhalten bei den Bürstendichtungen möglich. Wie zu erwarten, weist das Referenzlabyrinth SSS-1 mit der größten Spaltweite die höchsten Leckagewerte auf.

Es ist eine direkte Proportionalität der Leckage zum Druckverhältnis sowie zur Spaltweite erkennbar. Eine Reduktion der Spaltweite von 0.5 mm auf 0.27 mm (SSS-2) bewirkt eine Reduktion der Leckage im selben Verhältnis. Die beste Dichtwirkung ist bei SSB-1 zu verzeichnen. Hier wirken sich der große Borstendurchmesser kombiniert mit dem Gehäusedesign ohne Hinterlüftung der Rückplatte positiv auf das Leckageverhalten auf. Obwohl SSB-2 einen ähnlichen Borstendurchmesser aufweist wie SSB-1, fällt die Leckage hier deutlich höher aus. Der Grund hierfür liegt im Design des Bürstengehäuses, das einen Hohlraum in der Rückplatte stromabwärts des Borstenpaketes aufweist (siehe Abbildung 4). Dadurch erhält das Borstenpaket eine flexiblere Charakteristik, die aber mit einer schlechteren Dichtwirkung einhergeht. Der Einfluss des Borstendurchmessers wird mit dem Vergleich mit einer Dichtung aus KW 21 Phase I klar. Trotz einer Kaltspaltweite unter dem Borstenpaket von 0.31 mm (siehe Abbildung 4) stellt sich bei SSB-3 unter gleiche Bedingungen eine ähnliche Dichtwirkung ein wie bei der SSB-2 Dichtung ohne Spalt. Da beide Dichtungen über ein sehr ähnliches Gehäusedesign verfügen, ist der Grund hierfür in dem deutlich kleineren Borstendurchmesser der SSB-3 Dichtung zu suchen (0.07 mm verglichen mit 0.15 mm). Der schmale Borstendurchmesser verhilft der SSB-3 Dichtung auch als einziger kombinierter Bürstendichtung zu einem deutlichen Blow-down Verhalten und damit einer Abnahme der effektiven Spaltweite mit steigendem Druckverhältnis (siehe Abbildung 5). Die Dichtlabyrinthe wie auch die kombinierten Bürstendichtungen SSB-1 und SSB-2 weisen ab Druckverhältnissen über 4 eine konstante effektive Spaltweite auf.

5.1.2 Lokale Koeffizienten



Abbildung 6 zeigt die statischen Koeffizienten bestehend aus der radial gerichteten Hauptsteifigkeit kxx sowie der Nebensteifigkeit kxy in tangentialer Richtung.

Abbildung 6: Lokale Steifigkeitskoeffizienten



Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu den Ergebnissen aus KW21 Phase 1 zu ermöglichen, sind die Koeffizienten über dem Produkt aus Druckgefälle und Vordrall aufgetragen. Die Fehlerbalken bezeichnen die Streuung der Koeffizienten über die unterschiedlichen Lagerabstände. Die Mittelung der Ergebnisse erfolgte mit der Methode der kleinsten Quadrate.

Die Labyrinthdichtung SSS-2 [8] weist die größte negative lokale Hauptsteifigkeit auf. Eine Vergrößerung der Spaltweite von 0.27 auf 0.5 mm (SSS-1) bewirkt eine deutliche betragsmäßige Reduktion der Hauptsteifigkeit. Die Bürstendichtungen ohne Kaltspalt (SSB-1, SSB-2) zeigen moderate positive Hauptsteifigkeiten, der Kaltspalt kombiniert mit dem kleineren Borstendurchmesser bei SSB-3 [11] führt zu sehr kleinen Hauptsteifigkeiten mit einer leichten Tendenz ins Negative. Grundsätzlich bewirkt eine negative Hauptsteifigkeit eine Absenkung der Systemeigenfrequenz. Bei den Labyrinthdichtungen führt eine Erhöhung von Druckgefälle und Vordrall also eine Absenkung, bei den Kontaktbürstendichtungen einen leichten Anstieg der Systemeigenfrequenz. Der harmonisch stabile Bereich der Maschine wird so direkt von Änderungen der Betriebsparameter Druck und Drall beeinflusst, wie sie z.B. bei Lastwechseln der Maschine auftreten.

Die Nebensteifigkeit in tangentialer Richtung bewirkt die sogenannte Spalterregung. Hier wird der Rotor durch tangentiale Anfachung auf eine Spiralbahn gezwungen was zu einem Anstreifvorgang führen kann. Wie bei der Hauptsteifigkeit bewirkt auch bei der Nebensteifigkeit eine kleinere Spaltweite bei den Labyrinthdichtungen wesentlich höhere Werte und damit eine höhere Tendenz zur Schwingungsanfachung. Bei der Bürstendichtung SSB-2 wurden die größten Werte der Messreihe festgestellt, bei SSB-1 die niedrigsten. Der Blow-Down Effekt führt bei SSB-3 zu einem degressiven Verlauf der Nebensteifigkeit. Bei alleiniger Betrachtung der lokalen Koeffizienten würde das Ersetzen der Referenzdichtung SSS-1 durch eine SSB-2 Dichtung eine deutlich höhere Queranfachung bewirken.

5.1.3 Globale Koeffizienten

Im Gegensatz zu den lokalen Koeffizienten, welche nur die aerodynamischen Effekte in den Dichtkammern berücksichtigen, bilden die globalen Koeffizienten den Gesamten Dichtungsbereich sowie mechanische Komponenten in der Borstenkontaktzone ab. Die dynamischen Experimente am schwingenden Rotor erlauben zusätzlich die Bestimmung der Dämpfungskoeffizienten.

5.1.3.1 Globale Radialkomponenten

Die radialen Steifigkeits- und Dämpfungskoeffizienten sind in Abbildung 7 dargestellt. Bei den Labyrinthdichtungen ist der Verlauf von Hauptsteifigkeit und Nebendämpfung im untersuchten Bereich unabhängig von der Spaltweite, sowohl SSS-1 wie auch SSS-2 zeigen einen identischen Verlauf bei gleichen Betriebsbedingungen.







Die beobachtete globale Hauptsteifigkeit bei den Bürstendichtungen ist um Faktor 10 höher als bei den lokalen Ergebnissen. Dies liegt am mechanischen Einfluss des Borstenpaketes, der beim dynamischen Experiment berücksichtigt wird und bei den Kontaktdichtungen im Vergleich mit den aerodynamischen Effekten deutlich überwiegt. Die axiale Kompression des Borstenpaketes durch das Druckgefälle führt zu einem Anstieg der Reibung innerhalb der Einzelborsten sowie zwischen dem Borstenpaket und der stromabwärts liegenden Gehäusehälfte. Dieser Effekt führt zu einem deutlichen Anstieg der mechanischen Steifigkeit des Borstenpaketes mit steigendem Druckgefälle. Die Bürstendichtung SSB-3 liegt aufgrund ihrer Kaltspaltauslegung und dem dünneren Drahtdurchmesser bei der Betrachtung der globalen Hauptsteifigkeit deutlich unter den anderen untersuchten Designs, weist aber zugleich die höchste Nebendämpfung auf. Hier zeigen die Kontaktdichtungen negative Werte, tragen als zu einer Rückstellung des Rotors in radialer Richtung bei.

Der Messbereich des dynamischen Experiments ist verglichen mit dem statischem Versuch deutlich limitiert. Der Grund hierfür liegt bei den begrenzten Magnetlagerkräften. Die starke Anhebung der Eigenfrequenz im druckbeaufschlagten Fall muss durch das Magnetlager kompensiert werden, was gerade bei den spaltlosen Bürstendichtungen den durch die Versuche abzubildenden Druckbereich einschränkt.

5.1.4 Globale Tangentialkomponenten

Bei den Labyrinthdichtungen ist ein linearer Zusammenhang zwischen der globalen Nebensteifigkeit und dem Produkt aus Vordrall und Druckgefälle erkennbar (siehe Abbildung 8). Die kombinierte Bürstendichtung mit Kaltspalt (SSB-3) weist ein ähnlich hohes Niveau der Nebensteifigkeit auf wie es bei den Labyrinthen gemessen wurde.





Abbildung 8: Globale Koeffizienten in tangentialer Richtung

Der mechanische Einfluss der Borstenkontaktzone bewirkt bei den Bürstendichtungen negative, betragsmäßig kleine Werte bei der globalen Nebensteifigkeit. Bei den Labyrinthdichtungen ist ein linearer Zusammenhang zwischen Druck, Vordrall und hohen Nebensteifigkeitswerten erkennbar. Während also die Labyrinthdichtungen SSS-1, SSS-2 sowie die Bürstendichtung mit Spalt SSB-3 eine starke Anfachung des Rotors erzeugen, wirken die Kontaktdichtungen SSB-1 und SSB-2 unter gleichen Betriebsbedingungen stabilisierend. Dieser Effekt wird noch durch den Verlauf der globalen Hautdämpfung verstärkt. Alle untersuchten Bürstendichtungen weisen hohe Dämpfungswerte in tangentialer Richtung mit stark progressivem Verlauf bei steigendem Druck auf. Die Dämpfungswerte der Labyrinthdichtungen verlaufen auf wesentlich niedrigerem Niveau mit steigenden Fluidparametern degressiv.

5.1.5 Schlussfolgerungen aus den statischen und dynamischen Ergebnissen

Das Ersetzen einer Labyrinthdichtung (SSS-1) durch eine Bürstendichtung (SSB-1) bewirkt unter gleichen Betriebsbedingungen eine Leckagereduktion von 80 % (Siehe Abbildung 5). Bei den Labyrinthdichtungen besteht eine direkte Proportionalität zwischen der Spaltweite und Leckage, die globalen Radialkomponenten bleiben aber von dieser unbeeinflusst. Die experimentell bestimmten Steifigkeits- und Dämpfungseigenschaften der kombinierten Labyrinth- Bürstendichtungen beweisen neben den besseren Dichtungseigenschaften überlegene rotordynamische Eigenschaften gegenüber reinen Labyrinthdichtungen. Es ist ein deutlicher Einfluss des Borstenpaketes sowie des Gehäusedesigns auf Leckage sowie die Stabilität zu verzeichnen.

5.1.6 Experimenteller Nachweis von Spiralschwingungen

Gerade bei berührenden Dichtsystemen stellt neben der Spalterregung die Spiralschwingung eine zu beachtende Problematik dar, da Effekte in der Kontaktzone berücksichtigt werden. Hier wird durch einen Anstreifvorgang zwischen Rotor und Stator Wärme in den Rotor eingeleitet was zu einer thermischen Verkrümmung führt. Ein selbstverstärkender Effekt stellt sich ein, welcher eine langsame Bewegung des Schwingbahnmittelpunktes auf einer sich aufweitenden Spiralbahn bewirkt. Dieser Effekt wurde bislang in den Schleifringen von Generatoren [12] sowie in Gleitlagern [13, 14] nachgewiesen.



Die Anregung von Spiralschwingungen ist auf den in den Kapiteln 1.3 sowie 1.4 beschriebenen Prüfständen nicht möglich. Daher wurde auf einen kommerziell verfügbaren Modellrotor zu Demonstrationszwecken zurückgegriffen (GE Bentley Nevada Rotorkit RK 4, siehe Abbildung 9).



Abbildung 9: Experimenteller Nachweis von Spiralschwingungen

Der Wärmeeintrag durch den Anstreifvorgang wurde im Modellversuch durch einen regulierbaren Heißluftstrom in einen speziell konstruierten Rotor simuliert, der drehzahlsvnchron ein asymmetrisches Temperaturfeld und damit eine thermische Verkrümmung der Rotorwelle erzeugt. Es konnten mit diesem Einfachen Aufbau Spiralschwingungen unter verschiedenen Bedingungen erzwungen und charakterisiert werden. Abbildung 9 zeigt den Verlauf einer Spiralbahn über die Zeitdauer von 90 s entgegen der Drehrichtung der Welle, durchgeführt bei 800 U/min Wellendrehzahl und 285°C Lufttemperatur. Nachteil dieses Versuchskonzeptes ist die schwierige Quantifizierung des Wärmeeintrages in den Rotor und insbesondere der Kühlung des Rotors zur Umgebung hin. Eine genaue Bestimmung der Temperaturverteilung im Rotor ist daher nicht möglich. Es konnte aber die Machbarkeit eines Laborversuches mit erzwungenen Spiralschwingungen nachgewiesen werden, welche bislang nur theoretisch sowie aus Überwachungsprotokollen realer Maschinen heraus analysiert werden konnten. Derzeit befindet sich ein Testrotor mit integrierten Peltier Elementen in der Entwicklung, welcher eine direkte thermoelektrische Regelung des Temperaturfeldes ermöglicht. Ziel dieser Maßnahme sind Parameterstudien mit Spiralvibrationen und eine zusätzliche Validierung der zu Grunde liegenden theoretischen Modelle.

5.1.7 Wärmeeintragsmessungen

Zur Abschätzung der Verlustleistung sowie deren Sensitivität gegenüber den Betriebsparametern ist die Erfassung der Reibungstemperatur in der Kontaktzone zwischen Borstenpaket und Rotoroberfläche sinnvoll. Hierfür wurden Pyrometermessungen am statischen Prüfstand durchgeführt.





Abbildung 10: Wärmeeintragsmessungen am statischen Rotorprüfstand

Abbildung 10 zeigt den Versuchsaufbau, die Kalibrierkurve für unterschiedliche Borstendurchmesser sowie die Reaktion der Kontaktzonentemperatur auf die Variationen unterschiedlicher Betriebsparameter. Aufgrund der Kombination von metallischen Oberflächen und niedrigen zu erwartenden Temperaturen wurde ein Pyrometer mit einem Wellenlängenbereich zwischen 8 und 14 µm gewählt. Der Messfleck kann durch eine spezielle Optik auf einem Durchmesser von 1.2 mm fokussiert werden. Da der Emissionsgrad des Borstenpaketes nicht bekannt ist, wurden Kalibrierversuche mit zwei verschiedenen Borstenpaketen (SSB-2, SSB-3) durchgeführt. Es ist ein deutlicher Einfluss des Borstendurchmessers zu erkennen. Die Kalibrierkurve setzt sich aus der Bestimmung der temperaturabhängigen Abweichung zu einer Referenztemperatur im Borstenpaket zusammen, die durch ein angelötetes Miniaturthermoelement bestimmt wurde. Abbildung 10 zeigt Messergebnisse bei konzentrischer Rotorausrichtung. Die Druckvariation wurde bei einer Drehzahl von 6000 rpm und einem konstanten Vordrall von 150 m/s durchgeführt. Man kann eine Proportionalität zwischen der Kontaktzonentemperatur und dem Druckgefälle über der Dichtung erkennen. Das weitere Ansteigen der Temperatur beim Absenken des Druckgefälles verdeutlicht, dass ein großer Teil der Reibungswärme über die Luftströmung abgeführt wird. Die Drallvariation wurde wiederum bei einer Drehzahl von 6000 rpm und einem Druckgefälle von 5 bar über die Dichtung durchgeführt. Entgegen der Erwartung führt eine Steigerung des Vordralls auch zu einer Temperaturerhöhung in der Kontaktzone. Die aus hoher Drallgeschwindigkeit und geringer Leckage resultierende hohe Umfangskomponente im Fluid bewirkt hie rein radiales Druckgefälle im Borstenpaket, das den Anpressdruck der Borsten auf den Rotor erhöht. Die Drehzahlvariation bestätigt einen direkten Zusammenhang zwischen Drehzahl und Reibungswärme. Die Aussagen sind aufgrund der Wärmeabfuhr in Luft und Rotor qualitativer Natur.

5.2 Theoretische Ergebnisse

Ein kommerzieller CFD-Code ANSYS CFX wurde verwendet, um Eigenschaften von kurzen Labyrinthdichtungen in Kamm-Nut-Anordnung (SSS-1) und kombinierten Labyrinth-Bürstendichtungen (SSB-1, SSB-2) zu berechnen. Hierfür wurden dreidimensionale Modelle mit exzentrischem Rotor aufgebaut. Bei der Erstellung der strukturierten Rechengitter wurde die kommerzielle Software ANSYS ICEM CFD verwendet. Um den Einfluss des Gitternetzes auf die numerischen Ergebnisse auszuschließen, wurde eine umfassende Gittervalidierung durchgeführt.



Das CFD-Modell basiert auf den kompressiblen RANS-Gleichungen mit SST-Turbulenzmodell. Dabei werden beim SST-Turbulenzmodell die automatische Wandfunktion und die Korrekturfunktion (eine Begrenzung des Produktionsterms der turbulenten kinetischen Energie) verwendet. Als Standardverfahren zur Ermittlung der rotordynamischen Koeffizienten wurde der Whirling-Rotor-Ansatz herangezogen.

Das Borstenpaket wurde mit Hilfe geeigneter, anisotroper Porositätsmodelle gemäß Formel (5) modelliert.

$$\begin{aligned} &-\frac{\partial p}{\partial x_i} = a_i \mu v_i + b_i \rho |v_i| v_i \\ &a_n = a_z = 80 C, \qquad a_s = 32 \varepsilon \\ &b_n = b_z = 1.16 D, \qquad b_s = 0 \\ &C = (1-\varepsilon)^2 \varepsilon^{-3} d^{-2}, \qquad D = (1-\varepsilon) \varepsilon^{-3} d^{-1} \end{aligned}$$

5

Die Komponenten der mechanischen Steifigkeit des Borstenpakets wurden nach [16] bestimmt und zu globalen, aerodynamischen Steifigkeitskoeffizienten addiert.

Die Einzelheiten den verwendeten Modellen und deren Analyse können in [5-8, 15] gefunden werden. Abbildung 11 zeigt die Netzstruktur und den Druckabbau (Einheit: Pa) im Längsschnitt der Dichtung SSB-1. Sehr gut zu erkennen ist der dominierende Druckabfall über die Bürstendichtung. Das Labyrinth kann durch das mangelnde Druckgefälle über die Spaltgeometrien keine Beschleunigung bzw. Verwirbelung bewirken und ist daher nahezu funktionslos.



Abbildung 11: Netzstruktur und Druckabbau für die Dichtung SSB-1





5.2.1 Theoretische Bestimmung des Leckageverhaltens

Abbildung 12: Theoretisch sowie experimentell bestimmte Leckage

Abbildung 12 vergleicht den aus der numerischen Simulation gewonnenen Leckagemassenstrom mit den experimentellen Ergebnissen für die Dichtungen SSS-1, SSB-1 und SSB-2. Es kann jeweils ein linearer Zusammenhang zwischen Leckage und Vordruck erkannt werden, der typisch für überkritische Strömungsverhältnisse ist. Der Vergleich zwischen Simulation und Experiment zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Bei SSS-1 sowie SSB-1 liegen die Leckageergebnisse in der Simulation leicht höher als die Versuchsdaten.

5.2.2 Lokale Simulationsergebnisse

In Abbildung 13 werden die theoretischen und experimentellen Ergebnisse der lokalen Koeffizienten bei gleichen Bedingungen gegenübergestellt. Bei der radial gerichteten Hauptsteifigkeit ist eine sehr gute Vorhersagegenauigkeit der Simulation zu verzeichnen.

Auch bei der Nebensteifigkeit der Labyrinthdichtung SSS-1 stimmen Simulation und Experiment gut überein. Die Bürstendichtungen hingegen zeigen eine Überschätzung (SSB-1) bzw. eine Unterschätzung (SSB-2) der simulierten Werte gegenüber dem Experiment. Die qualitative Abbildung der Koeffizientenverläufe über den Vordruck ist in allen Fällen zutreffend.



Abbildung 13: Theoretische und experimentelle lokale Steifigkeitskoeffizienten





5.2.3 Globale Simulationsergebnisse

Abbildung 14: Theoretische und experimentelle globale Koeffizienten

Wie in Kapitel 1.4 beschrieben, beinhalten die globalen Koeffizienten neben den aerodynamischen auch die mechanischen Einflüsse in der Kontaktzone zwischen Rotoroberfläche und Borstenpaket. In Abbildung 14 sind die theoretischen Ergebnisse den gemessenen Globalkoeffizienten gegenübergestellt. Die Vorhersage der Globalen Hauptsteifigkeit ist bei der Labyrinthdichtung SSS-1 mit guter Übereinstimmung möglich. Bei den Bürstendichtungen hingegen bewirkt die Addition der mechanischen Komponente eine Überschätzung der Hauptsteifigkeit bei kleinen Drücken bei einem zu flachen Verlauf hin zu größeren Druckverhältnissen. Die globale Nebendämpfung wird bei allen untersuchten Dichtungen gegenüber den experimentellen Ergebnissen deutlich überschätzt.

Die globale Nebensteifigkeit sowie die Hauptdämpfung der Labyrinthdichtung wird von den theoretischen Ergebnissen sehr gut wiedergegeben, bei den Bürstendichtungen SSB-1 und SSB-2 treten deutliche Abweichungen auf.

Die sehr sensible theoretische Bestimmung der Koeffizienten ist bei reinen Labyrinthdichtungen mit guter Genauigkeit möglich. Bei Kontaktdichtungen ist die Vorhersage der globalen Koeffizienten durch die Effekte in der Borstenkontaktzone deutlich erschwert. Es existieren bislang wenige Daten über die parameterabhängigen mechanischen Eigenschaften druckbeaufschlagter Bürstendichtungen. Die Abbildung sämtlicher Effekte in der Simulation scheitert durch die Notwendigkeit einer vollen Dichtungsgeometrie über den Umfang bislang am Rechenaufwand und der hohen Sensibilität der Modelle.



6 Wesentliche terminliche und inhaltliche Abweichungen zum Projektantrag

Es konnten alle im Projektantrag festgelegten Themenschwerpunkte abgearbeitet werden. Entgegen dem festgesetzten Zeitplan konnten die Experimente allerdings nicht im Jahr 2011 abgeschlossen werden. Der Grund hierfür liegt einerseits in den umfangreichen Umbauarbeiten an den Prüfständen zum Projektbeginn, welche den Start der ersten Experimente hinauszögerten. Zudem stellte die Bereitstellung speziell angefertigter Bürstendichtungen für die Prüfstände eine weitere Verzögerung dar. Durch den effizienteren Ablauf der Messungen auf den modernisierten Versuchsanlagen konnten die Experimente dann aber wesentlich schneller, genauer und umfangreicher durchgeführt werden.

7 Publikationen und Patente

7.1 Im Rahmen des Projektes entstandene Publikationen

7.1.1 Begutachtete Publikationen

- A. O. Pugachev; U. Kleinhans; M. Gaszner: Prediction of rotordynamic coefficients for short labyrinth gas seals using CFD. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power (2012), Vol. 134, S. 062501–10.
- [2] M. Gaszner; A. O. Pugachev: Experimental techniques for determining rotordynamic coefficients of gas seals: Results for short staggered labyrinth seals and comparison with CFD. Proceedings of 10th international Conference on vibrations in rotating machinery, London, UK (2012), C1326/019, S. 455–466.
- [3] M. Gaszner; A. Pugachev; C. Georgakis; P. Cooper: Leakage and rotordynamic coefficients of brush seals with zero cold clearance used in an arrangement with labyrinth fins. ASME Turbo Expo, San Antonio, Texas, USA (2013), GT2013-94342 (eingereicht).
- [4] A. Pugachev: Predicted performance of brush seals: porous medium versus resolved bristle matrix and comparison with experimental data. 10th European Conference on Turbomachinery, Lappeenranta, Finland (2013) (eingereicht).

7.1.2 Nicht-begutachtete Publikationen.

Es sind im Rahmen des Teilprojektes KW 21 BY09 DT keine nicht-begutachteten Publikationen entstanden.

7.2 Gemeinsame Publikationen zweier oder mehrerer KW21 Teilprojekte

Es sind im Rahmen des Teilprojektes KW 21 BY 09DT keine gemeinsamen Publikationen zweier oder mehrerer KW 21 Teilprojekte entstanden.



7.3 Weitere Publikationen

- [5] R.M. Pastrana, C.E. Wolfe, N.A. Turnquist, and M.E. Burnett. Improved steam turbine leakage control with a brush seal design. Proceedings of the 30th Turbomachinery Symposium (2001).
- [6] H.-J. Thomas. Instabile Eigenschwingungen von Turbinenläufern, angefacht durch die Spaltströmungen in Stopfbuchsen und Beschaufelungen. Technischer Bericht Nr 1150, AEG (1956), S. 31.
- J.S. Alford. Protecting turbomachinery from self-excited rotor whirl. ASME J. Eng. Power (1965), Vol. 87, S. 333-344.
- [8] A.O. Pugachev and M. Deckner. Analysis of the experimental and CFD-based theoretical methods for studing rotordynamic characteristics of labyrinth gas seals. Proceedings of ASME Turbo Expo, Glasgow, UK (2010), GT2010-22058.
- [9] S. Dinc, M. Demiroglu, N. Turnquist, J. Mortzheim, G. Goetze, J. Maupin, J. Hopkins, C.Wolfe, and M. Florin. Fundamental design issues of brush seals for industrial applications. ASME J. Turbomachinery (2002), Vol. 124, S. 293-300.
- [10] K.J. Conner and D.W. Childs. Rotordynamic coefficient test results for a fourstage brush seal. Journal of Propulsion and Power (1993), Vol. 9, S. 462-465.
- [11] A.O. Pugachev and M. Deckner. CFD prediction and test results of stiffness and damping coefficients for brush- labyrinth gas seals. Proceedings of ASME Turbo Expo, Glasgow, UK, GT2010-22667.
- [12] L. Eckert and J. Schmied. Spiral vibration of a turbogenerator set: Case history, stability analysis, measurements and operational experience. ASME J. Eng. Gas Turbines Power (2008), Vol. 130, S. 012509-10.
- [13] J. Schmied, J. Pozivil, and J. Walch. Hot spots in turboexpander bearings: Case history, stability analysis, measurements and operational experience. Proceedings of ASME Turbo Expo, Berlin, Germany (2008), GT 2008-51179.
- [14] F. de Jongh. The synchronous rotor instability phenomenon Morton effect. Thirty Seventh Turbomachinery Symposium, Texas A&M University (2008), S.159-167.
- [15] A.O. Pugachev, and M. Deckner. Experimental and theoretical rotordynamic stiffness coefficients for a three-stage brush seal. Mechanical Systems and Signal Processing (2012), Vol. 31, S. 143-154.
- [16] M. Demiroglu, M. Gursoy, and J.A. Tichy. An investigation of tip force characteristics of brush seals. Proceedings of ASME Turbo Expo, Montreal, Canada (2007), GT2007-28042.

7.4 Im Rahmen des Projektes entstandene Patente

Patente sind im Rahmen dieses KW 21 Teilprojektes nicht entstanden.



8 Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses

Es wurden im Rahmen des Projektes BY 09DT überwiegend Semester- und Bachelorarbeiten vergeben. Für die experimentelle Arbeit wurden bewusst keine wissenschaftlichen Hilfskräfte hinzugezogen da das Interesse an einer guten wissenschaftlichen Arbeit im Rahmen von Studienarbeiten wesentlich höher ist als bei einer nach Zeit bezahlten Aufgabe.

8.1 Studentische Mitarbeiter

M. Hertwig Fertigung einer 9 Loch Kugelsonde zur Strömungsvermessung

8.2 Studien-, Semester- und Bachelorarbeiten

T. Bierschenk	Konstruktive Änderungen an einer Rotordynamikversuchsanlage (DiplIng. Maschinenbau)
J. Bimüller	Inbetriebnahme einer Kugelsonde zur räumlichen Strömungs- vermessung in Gasdichtungen (DiplIng. Maschinenbau)
A. Dandl	Vorbereitung und Durchführung rotordynamischer Untersuchungen von Turbomaschinendichtungen (DiplIng. Maschinenbau)
A. Hertig	Vorbereitung und Durchführung von Wärmeeintragsmessungen an DT Dichtungen (DiplIng. Maschinenbau)
M. Hertwig	Vorbereitung und Durchführung von statischen Experimenten zur Bestimmung der aerodynamischen Steifigkeitskoeffizienten von Dampfturbinendichtsystemen (DiplIng. Maschinenbau)
J. Kappauf	Durchführung von überkrititschen Rotorexperimenten zur Bestimmung der Steifigkeits- und Dämpfungskoeffizienten von Turbomaschinendichtungen (DiplIng. Maschinenbau)
S. Kronthaler	Experimentelle Studie zu Teilungs- und Designeinflüssen auf Leckage und Stabilitätsverhalten von Bürstendichtungen (B.Sc. Maschinenbau)
C. Pohl	Literaturrecherche zu den wichtigsten Evolutionsstufen der technischen Entwicklung von Kraftwerksdampfturbinen (DiplIng. Maschinenbau)
T. Rauner	Modellierung und Simulation eines Rotorsystems (DiplIng. Maschinenbau)
M. Remy	Inbetriebnahme des Modellrotorprüfstandes und Entwicklung eines Studentenpraktikumsversuchs (DiplIng. Maschinenbau)



M. Rey	Untersuchung von Rotorinstabilitäten an Turbomaschinen durch Spiralanfachung (B.Sc. Maschinenbau)
J. SArdey	Hard- und Softwareertüchtigung sowie Erzwingung kontrollierter Spiralschwingungen an einem Modellrotorprüfstand (DiplIng. Maschinenbau)
J. Stöckl	Vorbereitung und Durchführung von dynamischen Experimenten zur Bestimmung der Steifigkeits- und Dämpfungskoeffizienten eines Rotorsystems (DiplIng. Maschinenbau)
H. Degen	Validierung des CFD-Modells zur Bestimmung von rotordyna- mischen Koeffizienten der Labyrinthdichtungen anhand der Messdaten für Vordrücke bis zu 70 bar (DiplIng. Maschinenbau)
A. Gerner	Simulation lokaler Strömung in einem Borstenpaket unter Berücksichtigung der Fluid-Struktur-Interaktion (DiplIng. Maschinenbau)
T. Baumann	Analyse der Kalibrierungsverfahren bei der Modellierung moderner Bürstendichtungskonzepte (DiplIng. Maschinenbau)
R. P. Zhang	Modellierung einer kurzen Kamm-Nut-Labyrinthdichtung mittels dem Simulationsprogramm OpenFOAM. (DiplIng. Maschinenbau)

8.3 Diplom- und Masterarbeiten

M. Gaszner	Modernisierung des Messprogrammes zur Untersuchung des statischen und dynamischen Verhaltens von Dampfturbinen- dichtungen (DiplIng. Maschinenbau)
U. Kleinhans	Modellierung moderner Dichtungskonzepte für Dampfturbinen (DiplIng. (FH) Maschinenbau)
M. Hertwig	Auslegung eines Sondensystems zur Vermessung des Strömungsfeldes in Spaltgeometrien (DiplIng. Maschinenbau)
A. Gerner	Ermittlung von rotordynamischen Koeffizienten für Dichtspalte in Pumpen mittels CFD (DiplIng. Maschinenbau)

8.4 Promotionen

M. Gaszner	Rotordynamische Eigenschaften von Bürstendichtungen
	(DrIng. Maschinenbau)

9 Forschungsprogramme des Bundes und der EU

9.1 Angaben, ob weitere Drittmittel zum Projektthema eingeworben wurden, insbesondere aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen des Bundes und der EU

Es wurden keinerlei zusätzliche Drittmittel zum Projektthema eingeworben.

9.2 Geplante Antragsstellung bzw. künftige Förderung aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen von Bund, EU etc. sowie allgemeinen Förderprogrammen (z.B. DFG)

Es wurden zwei Projektvorschläge erbracht: Eine Weiterführung der Zusammenarbeit mit ALSTOM Power mit dem Themenschwerpunkt Blattdichtungen für gasförmige Medien sowie eine Projektskizze mit der KSB AG über Rotordynamik von Hochleistungswasserpumpenkomponenten.



Arbeitskreis Fluiddynamik und Dampfturbine

Projekt: BW L 31DT

Temperaturabhängiges Verhalten von hochbeanspruchten Bauteilen großer Abmessungen mit ungleichartigen Schweißverbindungen

Projektleiter:	Prof. DrIng. Eberhard Roos Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart
Mitarbeiter:	DiplIng. Magdalena Speicher
	DiplIng. Stefan Krojer, M.S. (The George Washington University, Washington, DC, USA)
	DrIng. Andreas Klenk
Finanzierung:	Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg

1 Ausgangssituation

In den vergangenen Jahrzehnten wurde ein kontinuierlicher Anstieg des Energiebedarfs beobachtet. Abbildung 1 zeigt den Anstieg des weltweiten Verbrauchs an elektrischer Energie aus dem World Energy Outlook von 2009 [IEA09]. Der World Energy Outlook von 2012 geht davon aus, dass der Bedarf an elektrischer Energie bis 2035 um ca. 70 % auf rund 32000 TWh anwachsen wird, wobei über die Hälfte dieses Anstiegs auf Indien und China fällt [IEA12].





Abbildung 1: Weltenergieverbrauch bis 2035 [IEA09, IEA12]

Trotz eines anteiligen Rückgangs am weltweiten Energiemix wird Kohle weiterhin das wichtigste Standbein der globalen Energieerzeugung darstellen, insbesondere in nicht-OECD-Ländern [IEA12]. Gleichzeitig werden jedoch die leicht zugänglichen Ressourcen immer knapper und es müssen immer größere Anstrengungen unternommen werden, um diese Ressourcen weiter fördern zu können. Die aufwendige Förderung speziell von fossilen Brennstoffen hat schließlich sowohl ökonomische als auch ökologische Folgen.

Dem steigenden Energiebedarf stehen also eine Verknappung der zugänglichen Ressourcen, wirtschaftliche Interessen der Energieerzeuger und ein wachsendes Umweltbewusstsein der Bevölkerung gegenüber. Aus diesem Grund ist es zwingend erforderlich, Technologien zu entwickeln, die einerseits zur ressourcenschonenden Energieerzeugung beitragen und somit Kosten sparen und andererseits die Belastung für die Umwelt senken.

Die Erhöhung der Effizienz in fossil befeuerten Kraftwerken zur ressourcenschonenden Energieerzeugung kann durch mehrere Verbesserungsansätze erreicht werden, unter anderem durch eine Optimierung des Heizzyklus und eine Verbesserung der Strömungsverhältnisse. Ein wesentliches Optimierungspotenzial liegt in der Erhöhung der Parameter Dampftemperatur und Dampfdruck, was die Grundlage des hier vorliegenden Forschungsvorhabens darstellt. Experten sind sich einig, dass der Gesamtwirkungsgrad dieser Kraftwerke durch ein Zusammenwirken aller Potenziale auf über 50% gesteigert werden kann [LUE10, AVI05, KW2109].

Die Steigerung der Dampfparameter Druck und Temperatur erfordert den Einsatz neuartiger, hochwarmfester Werkstoffe wie beispielsweise der Nickelbasiswerkstoffe Alloy 617 oder Alloy 625. Bisher eingesetzte 912%-Chromstähle erreichen bei etwa 600°C die Grenze ihrer Einsetzbarkeit und können daher nicht für Turbinenwellen im Betriebsbereich von Temperaturen bis zu 720°C verwendet werden [SCHW04, GOE04 RAU06].

Der Einsatz von Nickelbasis-Superlegierungen ist jedoch mit technischen und wirtschaftlichen Schwierigkeiten verbunden. So sind die Kosten für diese Legierungen um ein Viel-



faches höher als die Kosten für konventionelle 912%-Chromstähle. Auf Grund der großen Belastungen, die während des Betriebs auf eine Turbinenwelle wirken, insbesondere der Rotationskräfte, müssen die mechanischen Eigenschaften sehr gut beherrschbar sein, was ein Schmieden des Bauteils erfordert. Hierbei muss beachtet werden, dass die Formgebung der Superlegierungen, wie beispielsweise beim Schmieden, auf Grund ihrer guten Temperatureigenschaften nur mit hohem materiellen und finanziellen Mehraufwand durchzuführen ist. Die Herstellung der Turbinenwelle durch Gießen ist technologisch in diesen Abmessungen auch wegen der nicht einfach zu beherrschenden Korngröße und -orientierung in den meisten Fällen nicht möglich. Auch die zerstörungsfreien Prüfmethoden stoßen bei austenitischen Werkstoffen oft an ihre Grenzen. Es ist also wirtschaftlich nicht sinnvoll und technologisch nicht möglich, Turbinenrotoren vollständig aus einer Nickelbasis-Superlegierung herzustellen.

Daher soll der Einsatz der Nickelbasis-Werkstoffe auf die Bereiche beschränkt werden, in denen konventionelle Hochtemperaturwerkstoffe einen Betrieb mit ausreichender Sicherheit nicht garantieren können. Für die Bereiche niedrigerer Temperaturen kann auf die bewährten 912%-Chromstähle zurückgegriffen werden. Die Verbindung der beiden Werkstoffe wird durch eine Schweißung realisiert, wie in Abbildung 2 schematisch dargestellt ist. Somit ist zusätzlich die Schweißeignung der Grundwerkstoffe zu einer ungleichartigen Schweißung sicherzustellen.



Abbildung 2: Temperaturverteilung der Turbinenwelle und Einsatz der Werkstoffe (schematisch)

Um die Herausforderung der Temperatur- und Drucksteigerung zu bewältigen, wurde bereits vor rund fünfzehn Jahren damit begonnen, geeignete Werkstoffe für den Betrieb eines AUSC-Kraftwerks ("Advanced UltraSupercritical") zu qualifizieren. Die meisten der untersuchten Werkstoffe werden bereits seit längerer Zeit eingesetzt, jedoch in wesentlich kleineren Dimensionen und kürzeren Lebensdauern als dies für eine Dampfturbine erforderlich ist [VIS09]. Folglich wurden technologische und wirtschaftliche Faktoren für Bauteile mit großen Abmessungen untersucht, so z. B. die Schweißeignung, die Eignung zur zerstörungsfreien Prüfung oder die Herstellkosten. Zusätzlich wurden die Materialien in der engeren Auswahl auf das Verhalten bei rissbehafteten Bauteilen, unter Kriechen und Relaxation, hoch- und niederzyklischer Ermüdung (HCF bzw. LCF), und die Warmzugeigenschaften untersucht. Die Entscheidung für die zielgerichtete weitere Untersuchung fiel schließlich auf die Nickelbasislegierungen Alloy 617 und Alloy 625 [KER05, SCA04, SCH004]. Diese beiden Werkstoffe bilden daher auch die Grundlage für das hier vorliegende Forschungsvorhaben.



Die Entstehung von Fehlern in Schweißnähten kann trotz ständigen technologischen Fortschritts nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Zudem werden die Werkstoffeigenschaften des Grundwerkstoffs in unmittelbarer Nähe der Schweißnäht durch den Schweißprozess verändert. Eine Übersicht über die Beeinflussung des Grundwerkstoffs im Bereich der Schweißverbindung ist in Abbildung 3 gegeben. Speziell im Einsatz bei hohen Temperaturen stellt der beeinflusste Grundwerkstoff in unmittelbarer Nähe der Schweißnaht, die sogenannte Wärmeeinflusszone, häufig den versagenskritischen Bereich dar [MAY07]. Daher ist eine genaue Untersuchung des Schweißbereichs für unterschiedliche Werkstoffkombinationen, wie sie in Turbinenwellen eingesetzt werden können, unerlässlich.



Abbildung 3: Gefügeveränderung im Bereich der Schweißnaht [BAU09]

Grobes Korn, wie es in der Grobkornzone oder WEZ 1 vorliegt, siehe Abbildung 3, kann sprödes Versagen begünstigen und die Festigkeits- und Verformungseigenschaften bei Warmzug- und LCF-Versuchen, in denen plastische Verformungen auftreten, verringern. Grobes Korn wirkt sich jedoch beispielsweise bei Zeitstandbeanspruchung vorteilhaft aus. Feines Korn, wie es in der Feinkornzone (WEZ 2) oder der interkritischen Zone (WEZ 3) vorliegt, kann zu früherem Versagen bei rissbehafteten Bauteilen oder bei Zeitstandbeanspruchung führen [CER07]. Zudem können Bindefehler, Diffusion, Einschlüsse oder Heißrisse im Schweißgut zu weiteren Schäden führen. Je nach Beanspruchungsart stellen also verschiedene Bereiche der Schweißnaht bzw. der Wärmeeinflusszone Schwachstelen der Verbindung dar. Diese gilt es genau zu identifizieren, um eine sichere Auslegung der Turbinenwelle gewährleisten zu können.

Zur Versuchsauslegung kann auf erste Erkenntnisse zum Verhalten von ungleichartigen Schweißverbindungen unter verschiedenen Beanspruchungszuständen zurückgegriffen werden, die in Phase I der Forschungsinitiative "Kraftwerke des 21. Jahrhunderts" gewonnen worden sind. Dabei wurde eine Verbindung aus einer Nickelbasis-Superlegierung und einem konventionellen 10%-Chromstahl untersucht.

Insbesondere wurden in Phase I bei langlaufenden, quasistatisch beanspruchten Proben, sehr verformungsarme Brüche in der Schmelzlinie, d.h. dem Übergang vom Schweißgut



zum Chromstahl, festgestellt. Beispielhaft ist in Abbildung 4 die Bruchfläche einer Zeitstandprobe bei T = 550 °C und σ = 245 MPa dargestellt. Rechts ist der Bruch in der Fusionslinie mit den Konturen der einzelnen Schweißlagen erkennbar, links der Restbruch in der Wärmeeinflusszone des 10 %-Chromstahls.



Abbildung 4: Bruchfläche einer Zeitstandprobe aus KW 21 Phase I

Versuche unter zyklischer Beanspruchung konnten die Schmelzlinie als vorherrschend versagenskritische Zone nicht bestätigen. Während die zyklischen Versuche bei Raumtemperatur im Alloy-Grundwerkstoff versagten, trat das Versagen bei erhöhter Temperatur überwiegend im Grundwerkstoff des 10 %-Chromstahls auf.

Auf Basis dieser Erkenntnisse erfolgt für das vorliegende Projekt eine Variation der eingesetzten Werkstoffe. Einerseits wird im Rahmen einer Versuchs-Rotorschweißverbindung ein anderer 10 %-Chromstahl eingesetzt als in Phase I, andererseits werden im Rahmen von drei Versuchs-Blockschweißverbindungen das eingesetzte Schweißgut und der Schweißnahtaufbau sowie der Alloy-Grundwerkstoff variiert, um den Einfluss dieser Faktoren auf das Verhalten der Schweißnaht in den quasistatischen Versuchen untersuchen zu können. Zusätzlich ist es erforderlich, die Ergebnisse der zyklischen Versuche aus Phase I an einer ausgewählten Verbindung zu bestätigen.

2 Projektziele

Ziel des Vorhabens ist die Ermittlung der Einflussfaktoren auf das temperaturabhängige Verhalten der Schweißverbindung einer Nickelbasislegierung an einen 10 %-Chromstahl, die numerische Modellierung dieses Verhaltens sowie die Sicherstellung der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Bauteilgeometrie. Insbesondere sollen die Schadensmechanismen und -orte aus den experimentellen Untersuchungen analysiert und beschrieben werden. Die Versuche werden bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt. Dies spielt insbesondere für die anisotherme Modellierung eine wichtige Rolle, da dabei über den zeitlichen Verlauf der Simulation nicht eine über die gesamte Geometrie verteilte,



konstante Temperatur vorliegt, sondern Temperaturgradienten, wie sie beispielsweise bei An- und Abfahrvorgängen einer Turbine auftreten, berücksichtigt werden müssen.

2.1 Umsetzung der Hinweise aus den bisherigen Begutachtungen

Die Hinweise aus der Zwischenbegutachtung wurden folgendermaßen umgesetzt:

Die Auswahl der Werkstoffpaarungen für die Schweißverbindungen erfolgte auf Basis von Erkenntnissen aus dem weiteren technischen Umfeld. Die Maßnahmen zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses resultierten in einer Projektarbeit und drei Studienarbeiten (siehe Kapitel 8). Die gewünschten Veröffentlichungen sind in Vorbereitung. Wegen unterschiedlicher Versagensverhalten der vier untersuchten Verbindungen ist es notwendig, die Ergebnisse vor ihrer Veröffentlichung weiter abzusichern. Dies konnte auf Grund der Verzögerungen (siehe Kapitel 6) noch nicht endgültig abgeschlossen werden.

3 Vernetzung

3.1 Vernetzung innerhalb KW21

Die Erkenntnisse aus dem Projekt können auch für andere Bereiche des Kraftwerks verwendet werden, in denen Hochtemperaturwerkstoffe eingesetzt werden, wie beispielsweise den Dampferzeugern. Zwar gilt das Hauptinteresse des Projekts der Untersuchung der Schweißverbindung für einen Turbinenrotor, jedoch existieren in vielen Bereichen eines Kraftwerks geschweißte Komponenten, die hohen Temperaturen und mechanischen Belastungen ausgesetzt sind.

Innerhalb der Forschungsinitiative KW21 Phase II war eine direkte Vernetzung mit anderen Teilprojekten jedoch nicht gegeben. Zwar befassten sich die Projekte BWW L 29DE und BY 11GT ebenfalls mit Nickelbasiswerkstoffen bzw. artgleichen Schweißverbindungen dieser Werkstoffe. Da die Nickelbasisseite sich im Projekt BWW L 31DT jedoch als nicht versagenskritisch herausstellte, konnten daraus nur wenige Synergieeffekte erzielt werden.

3.2 Vernetzung außerhalb KW21

Die Untersuchung von Mischverbindungen ist seit mehreren Jahren ein auf breiter Basis untersuchtes Forschungsgebiet. So wurden beispielsweise im Projekt "Verhalten von optimierten Werkstoffen und Werkstoffverbunden für 700-720 °C-Dampfturbinenbauteile" (COORETEC DT3) ungleichartige Schweißverbindungen aus einem 2 %-Chromstahl und einer Nickelbasislegierung untersucht. Projekte wie "Werkstoffqualifizierung für das 700/720 °C-Kraftwerk" (AVIF A 215) oder "Optimierung der Schweißverbindung zur Verhinderung des vorzeitigen Kriechversagens in der Wärmeeinflusszone über die gezielte Festigkeitsauswahl des Schweißgutes" (AVIF A 221) tragen zum besseren Verständnis der Ausbildung einer Wärmeeinflusszone und deren Verhalten im Hochtemperaturbereich bei.



4 Vorgehensweise und Methodik

Zunächsterfolgte für die erste Versuchsschweißverbindung, einer Rotorschweißverbindung aus einem wolframfreien 10 %-Chromstahl und der Nickelbasissuperlegierung Alloy 625, eine metallographische Untersuchung des Ausgangszustands. Dabei wurde eine Schädigung der Wärmeeinflusszone festgestellt, die bei der Wärmenachbehandlung aufgetreten war. Aus diesem Grund wurden drei Blockschweißverbindungen nachgeliefert. Als Grundwerkstoffe wurden dafür ein wolframlegierter 10 %-Chromstahl sowie die Nickelbasissuperlegierungen Alloy 617 bzw. Alloy 625 eingesetzt. Im Vergleich zur Rotorschweißverbindung wurde für die Blockschweißverbindungen ein anderes Schweißgut verwendet und Variationen im Schweißnahtaufbau vorgenommen. Der herstellungsbedingte Schaden in der Rotorschweißverbindung sowie die Zusatzlieferung der Blockschweißverbindungen erforderten eine Anpassung des ursprünglichen Versuchsplans.

Im folgenden Schritt erfolgt ebenfalls eine metallographische Grundcharakterisierung der drei Blockschweißverbindungen. Im Anschluss daran werden für die Blockschweißverbindungen Proben bei 550 °C und 600 °C unterschiedlich lang ausgelagert und erneut charakterisiert. Für eine ausgewählte Verbindung werden Probenrohlinge bei 550 °C und 600 °C für 500 h und 1000 h ausgelagert und im Zugversuch geprüft. Auf dieser Basis erfolgt ein Vergleich mit den ermittelten Festigkeits- und Verformungskennwerten im Ausgangszustand. An anderen durchgeführten quasistatischen und zyklischen Versuchen werden die Versagensmechanismen und orte bestimmt. Entsprechend der Ergebnisse aus Zeitstandversuchen wird eine Parameterstudie durchgeführt, durch die weitere Rückschlüsse auf die Ursache und den Mechanismus bei den Fusionslinienbrüchen im Zeitstandversuch gewonnen werden. Ebenso werden thermisch gefügesimulierte Proben geprüft, um das Versagensverhalten der Wärmeeinflusszone nachbilden und untersuchen zu können. Die Versuche zum Verhalten der Wärmeeinflusszone erstrecken sich auf Warmzug- und Zeitstandversuche.

Die ermittelten Werkstoffdaten werden zur Erstellung und Erweiterung von Materialmodellen eingesetzt. Insbesondere für die Wärmeeinflusszone ist dies sehr aufschlussreich, da die Verhalten dieses Werkstoffbereichs deutlich von dem des Grundwerkstoffs abweicht. Die Erkenntnisse zum Materialverhalten werden für die Modellierung des anisothermen Verhaltens der Komponente verwendet. Mit den gewonnenen Erkenntnissen über Versagensmechanismen ist eine bessere Beschreibung und Auslegung der Komponente für den Langzeitbetrieb möglich.

5 Projektergebnisse und Ausblick

Im folgenden Abschnitt werden die Projektergebnisse vorgestellt. Dabei werden die drei Blockschweißverbindungen mit BSV1, BSV2 und BSV3 bezeichnet.

5.1 Untersuchungen der Schweißnaht im Ausgangszustand

Im Ausgangszustand erfolgt eine metallographische Charakterisierung des Ausgangszustands der einzelnen Verbindungen. Ein WDS-Linescan zeigt keine besonderen Auffälligkeiten in den untersuchten Elementverteilungen, wie aus Abbildung 5 für BSV3 und die Rotorschweißverbindung hervorgeht.





Abbildung 5: Elementverteilungen für BSV3 und Rotorschweißverbindung aus WDS-Linescans

5.2 Zugversuche an ausgelagerten Proben

Die Grundcharakterisierung der Blockschweißverbindungen zeigt einen Unterschied in den Härtewerten der Nickelbasiswerkstoffe. Dieser kann in einer unterschiedlichen Wärme(nach)behandlung begründet sein. Um den Einfluss einer thermischen Auslagerung zu untersuchen, werden Probenrohlinge von BSV3 bei 550 °C und 600 °C für je 500 h und 1000 h ausgelagert und anschließend im Zugversuch bei 20 °C und 550 °C geprüft. Abbildung 6 zeigt die normierten Werte für Ersatzstreckgrenze, Zugfestigkeit, Bruchdehnung sowie Brucheinschnürung, wobei jeweils der Versuch im Ausgangszustand 100 % darstellt.



Abbildung 6: Vergleich ausgelagerte Werkstoffkennwerte und Ausgangszustand

Die Zugfestigkeit bleibt nahezu konstant. Der Anstieg in der Ersatzstreckgrenze ist auf eine Verringerung des Verformungsvermögens des Nickelbasisgrundwerkstoffs zurückzuführen. Die hohe Bruchdehnung bei Versuch 550 °C / 1000 h und 20 °C Prüftemeparatur ist durch Versagen im Nickelbasisgrundwerkstoff hervorgerufen, wodurch ein großer Bereich der Probe bis zur Einschnürung gleichmäßig gedehnt wird und die Verformung nicht wie in den übrigen Versuchen lokal auf eine Stelle begrenzt ist.



5.3 Untersuchung der Fehlermechanismen

Neben den ermittelten mechanischen Kenngrößen aus den Versuchen sind bei einer Mischschweißverbindung auch die Beschreibung des Versagensablaufs und die Vorhersage des Versagensortes speziell unter betriebsähnlicher Beanspruchung von großer Wichtigkeit.

5.3.1 Quasistatische Versuche

Für die Blockschweißverbindungen werden jeweils drei Zugversuche bei unterschiedlichen Prüftemperaturen durchgeführt. Dabei ist zu beobachten, dass für BSV1 und BSV3 bei 20 °C und 450 °C das Schweißgut die versagenskritische Stelle darstellt, während für BSV2 das Versagen im Nickelbasis-Grundwerkstoff auftritt. Bei 550 °C ist für alle drei Verbindungen das Versagen auf den Übergangsbereich zum 10 %-Chromstahl verschoben. Unter Berücksichtigung der temperaturabhängigen Festigkeitseigenschaften der eingesetzten Werkstoffe ist dies der zu erwartende Versagensort. Die Verformungskennwerte liegen für sämtliche Proben im Erwartungsbereich, es liegen also auch für den Versagensmechanismus keine Auffälligkeiten vor. Für die ausgelagerten Proben der BSV3 tritt das Versagen bei 20 °C wie im nicht ausgelagerten Fall im Schweißgut auf. Einzige Ausnahme ist ein Bruch im Nickelbasis-Grundwerkstoff. Die Versuche bei 550 °C weisen ebenfalls wie die nicht ausgelagerten Proben das Versagen im Übergangsbereich zum 10 %-Chromstahl auf. Es ergibt sich durch die Auslagerung also keine Veränderung des Versagensmechanismus und der Versagensorte.

Um sämtliche im geänderten Versuchsplan für die Rotorschweißverbindung vorgesehenen Experimente durchführen zu können, wird für diese Verbindung nur eine Warmzugprobe aus dem lichtoptisch ungeschädigt erscheinenden Bereich entnommen. Diese wird bei 550 °C geprüft, um den Vergleich zu den Blockschweißverbindungen bei der geplanten Einsatztemperatur führen zu können. Der Versagensort ist auch für die Rotorschweißverbindung Fall der Übergangsbereich in den Grundwerkstoff des 10 %-Chromstahls. Auch für diese Probe liegen die Verformungskennwerte im zu erwartenden Bereich.

Zeitstandversuche bei 550 °C werden für alle vier Verbindungen durchgeführt. Für kurze Laufzeiten kann bei BSV2 und BSV3 das Versagen im Übergangsbereich zum Grundwerkstoff des 10 %-Chromstahls lokalisiert werden, während die BSV1 Versagen im Bereich der Fusionslinie mit einem Restbruch sowohl auf der Schweißgut-Seite als auch auf der 10 %-Chromstahl-Seite aufweist. Die Rotorschweißverbindung zeigt ein Versagen in der Fusionslinie mit einem Restbruch in der WEZ des 10 %-Chromstahls. Für längere Versuchszeiten verschiebt sich durch die Spannungsumlagerung der Versagensort für BSV2 und BSV3 zur WEZ3 hin. Dies trifft auch auf BSV1 zu, wobei für diese noch ein teilweises Versagen in der Fusionslinie zu erkennen ist. Für die Rotorschweißverbindung treten auch bei längeren Laufzeiten Brüche in der Fusionslinie mit einem Restbruch aus der 10 %-Chromstahl-WEZ auf. Abbildung 7 gibt eine Übersicht über das Bruchaussehen und der Bruchlage der kurzlaufenden Proben bei 550 °C.


Anisotherm beanspruchte Mischverbindungen



Abbildung 7: Bruchflächen und Bruchlagenübersicht Zeitstandversuche bei 550 °C für vier verschiedene Schweißverbindungen

Für BSV3 und die Rotorschweißverbindung werden auch Zeitstandversuche bei 600 °C analysiert. Während für BSV3 die kurzlaufenden Versuche das Versagen wieder im Übergangsbereich zum Grundwerkstoff des 10 %-Chromstahls und bei längerlaufenden Versuchen in der WEZ3 aufweisen, tritt für die Rotorschweißverbindung das Versagen wieder in der Schmelzlinie mit WEZ-Restbruch auf.

5.3.2 Zyklische Versuche

Zyklische Versuche werden nur für BSV3 durchgeführt. Die Versuche im Low-Cycle-Fatigue (LCF)-Bereich zeigen für die Versuche mit hohen Dehnungsamplituden einen Anriss in der Schmelzlinie. Mit zunehmender Temperatur und abnehmender Dehnungsschwingbreite verlagert sich die Stelle des dominierenden Anrisses in den Bereich des 10 %-Chromstahls. Eine Übersicht über die Lage der dominierenden Anrisse gibt Tabelle 1. In Abbildung 8 sind zwei Schliffbilder dargestellt, die den Verlauf des Rissfortschritts zeigen.

	Dehnungsamplitude hoch	Dehnungsamplitude mittel	Dehnungsamplitude niedrig	
450 °C	Anriss Schmelzlinie	Anriss Schmelzlinie	Anriss Schmelzlinie	
550 °C	Anriss Schmelzlinie	Anriss Schmelzlinie	Anriss 10 %-Cr-Stahl	
600 °C	Anriss Schmelzlinie	Anriss 10 %-Cr-Stahl	Anriss 10 %-Cr-Stahl	

Tabelle 1:	Bereich des dominierenden Anrisses im LCF-Versuch





Abbildung 8: Rissfortschritt bei mittlerer Dehnungsamplitude

Für BSV3 werden auch Versuche im High-Cycle-Fatigue (HCF)-Bereich durchgeführt. Während die Versuche bei 20 °C und 550 °C im Schweißgut versagen, verschiebt sich der Versagensort bei 600 °C in den Übergangsbereich von Schweißgut zum 10 %-Chromstahl. Als Ursache für das Versagen im Schweißgut auch bei hohen Temperaturen im Vergleich zu den übrigen Versuchen ist die Inhomogenität des Schweißguts zu nennen, da bei diesen Versuchen selbst kleinste Schweißfehler oder Einschlüsse bereits zu vorzeitigem Versagen der Probe führen können.

5.4 Parameterstudie Zeitstandversuch

Um den Versagensablauf beim Schmelzlinienbruch im Zeitstandversuch besser untersuchen zu können, wird eine Parameterstudie durchgeführt. Dazu werden Proben aus dem ungeschädigten Teil der Rotorschweißverbindung eingesetzt, da für die Proben dieser Verbindung die Fusionslinienbrüche am deutlichsten auftreten. Zunächst werden vier identische Proben bei gleicher Temperatur und Last getestet. Nach Versagen der ersten Probe (Probe 3) wird die gebrochen Probe sowie eine Referenzprobe ausgebaut und untersucht. Die beiden weiteren Proben werden bis Bruch geprüft. Abbildung 9 zeigt die Bruchflächen (Proben 1 bis 3) sowie ein Schliffbild zum Rissverlauf entlang der Fusionslinie ausgehend von der Oberfläche (Probe 4) und gibt eine Übersicht über die normierten Laufzeiten der vier Proben, wobei die insgesamt am kürzesten gelaufene Probe, Probe 3, 100 % darstellt.



Anisotherm beanspruchte Mischverbindungen



Abbildung 9: Bruchaussehen und normierte Bruchzeiten Probe 1 - 4

Das Schliffbild von Probe 4 zeigt eine deutliche Oxidation. Dies wird bei Untersuchungen im REM bestätigt. Abbildung 10 a) zeigt einen FIB-Schnitt etwa 200 mm unterhalb der Probenoberfläche, Abbildung 10 b) zeigt ebenfalls einen FIB-Schnitt etwa 300 mm von der Probenoberfläche. Es ist deutlich zu erkennen, dass mit zunehmendem Abstand von der Probenoberfläche nur noch vereinzelt Kriechporen vorliegen, die Oxidation ist in diesen Bereichen noch nicht weit fortgeschritten.



a) ca. 200 µm unter der Oberfläche



b) ca. 300 µm unter der Oberfläche

Abbildung 10: FIB-Schnitte im Bereich der Fusionslinie

Aus diesem Grund werden vier weitere Proben identisch zu den vier vorhergehenden belastet. Die Proben 6 bis 8 werden mit einer Zunderschutzpaste (ZSP) belegt, um Oxidation zu verhindern, während Probe 5 im Ausgangszustand getestet wird. In Abbildung 11 sind die Bruchflächen für die Proben 5 bis 7 sowie ein Schliffbild für Probe 8 dargestellt und die normierten Laufzeiten in Referenz zu Probe 3 angegeben.







Anisotherm beanspruchte Mischverbindungen

Die Aufnahmen zeigen, dass auch die durch die Zunderschutzpaste geschützten Proben in der Fusionslinie versagen. Das Schliffbild von Probe 8 zeigt deutlich die Wirkung der Zunderschutzpaste, da im Gegensatz zu Probe 4 im Bereich des Grundwerkstoffs des 10 %-Chromstahls (links im Bild) kaum Oxidationsprodukte nachweisbar sind. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass sich auf Grund der stark unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten bereits bei Versuchsbeginn ein Sprung in der Zunderschutzpaste bildet und die metallurgische Kerbe weiterhin durch Oxidation hervorgerufen wird. Aus diesem Grund wird eine weitere Probe mit identischer Beanspruchung unter Schutzgasatmosphäre geprüft. Die Untersuchung dieser Probe ist zum Zeitpunkt der Berichterstellung noch nicht abgeschlossen.

5.5 Gefügesimulation

Die Ergebnisse der Zeitstandversuche aus den Blockschweißverbindungen zeigen im Vergleich zur Rotorschweißverbindung, dass für eine andere Schweißnahtkonfiguration die Wärmeeinflusszone den versagenskritischen Bereich darstellen kann. Aus diesem Grund werden Grundwerkstoffproben mit einem Temperaturprofil beaufschlagt, um das Entstehen der interkritischen Wärmeeinflusszone nachzubilden.

Für die gefügesimulierten Proben werden Warmzug- und Zeitstandversuche durchgeführt. Die Warmzugversuche zeigen, dass im Vergleich zur gesamten Schweißverbindung eine deutliche Steigerung von Streckgrenze und Zugfestigkeit vorliegt. Abbildung 12 a) zeigt die Fließkurven für Proben bei einer Spitzentemperatur aus der Gefügesimulation von 880 °C. Abbildung 12 b) zeigt das Verhalten im Kurzzeitstandversuch für Proben mit unterschiedlichen Spitzentemperaturen.







b) ZS-Festigkeit gefügesimulierte Proben





5.6 Modellierung des mechanischen Verhaltens

Zur Beschreibung des Verhaltens der Komponente werden nicht vorhandene Materialmodelle erstellt und vorhandene Materialmodelle erweitert. Die Formulierung der Materialmodelle muss anisotherm erfolgen, da die Gesamtkomponente einem Temperaturgradienten unterworfen ist, siehe Abbildung 13.





Abbildung 13: Schematischer Temperaturverlauf beim Anfahrvorgang

Die Komponente wird unter mehreren verschiedenen Randbedingungen auf die vorgegebenen Temperaturen aufgeheizt. Schematisch dargestellt ist in Abbildung 14 a) die Temperaturverteilung im Bauteil bei anisothermer Rechnung. Abbildung 14 b) zeigt die Verteilung der von Mises Vergleichsspannung für das Bauteil nach 10000 h Kriechen und einen Anfahrvorgang. Untersucht wird auch der Einfluss mehrerer An- und Abfahrvorgänge im Betrieb.



Abbildung 14: Temperatur- und Spannungsverteilung in der Komponente



5.7 Ausblick

Die untersuchten Blockschweißverbindungen weisen im Zeitstandversuch im Bereich bis 10000 h deutlich bessere Ergebnisse auf als die Werkstoffkombinationen der Rotorschweißverbindungen aus Phase I und Phase II. Eine Aussage, wie stark die Langzeiteigenschaften durch die neue Werkstoffkombination verbessert werden, muss jedoch noch abgesichert werden.

Mit dem eingesetzten Materialmodell können die sehr verformungsarmen Fusionslinienbrüche, wie sie in Kapitel 5.4 vorgestellt wurden, nicht abgebildet werden. Einen Aufschluss, ob dieses Phänomen auch für Komponenten mit großen Abmessungen auftreten kann, können die an kleinen Proben durchgeführten Versuche nicht mit Sicherheit liefern.

Für die Werkstoffkombination, wie sie bei der untersuchten Rotorschweißverbindung vorliegt, sind daher weitere Untersuchungen notwendig. Für die Werkstoffkombinationen, die für die Blockschweißverbindungen eingesetzt werden, muss das bessere Verhalten im Vergleich zur Rotorschweißverbindung noch in Langzeitversuchen bestätigt werden.

6 Wesentliche terminliche und inhaltliche Abweichungen zum Projektantrag

Für die Untersuchungen wurde zu Projektbeginn mit leichter zeitlicher Verzögerung eine Versuchsschweißverbindung bereitgestellt. Diese Verbindung wies jedoch bereits im Ausgangszustand eine Schädigung auf, welche die Durchführung der Versuche entsprechend dem ursprünglichen Versuchsplan unmöglich machte.

Aus diesem Grund wurden drei weitere Schweißverbindungen zur Verfügung gestellt. Dieser Umstand erforderte eine Überarbeitung des Versuchsplans, da nicht alle geplanten Versuche an allen Verbindungen durchgeführt werden konnten. Die Untersuchung der Versagensmechanismen und -orte im Vergleich der Verbindungen zueinander musste auf quasistatische Versuche begrenzt werden. Für eine ausgewählte Verbindung wurden aber wie geplant auch die Proben aus zyklischen Versuchen untersucht.

Diese nicht selbst verschuldeten Umstände erforderten eine kostenneutrale Verlängerung des Projekts über den ursprünglich geplanten Projektzeitraum hinaus.

Da sich die Eigenschaften der Zeitstandversuche als deutlich besser herausstellen, als dies aus Phase I der Forschungsinitiative zu erwarten gewesen wäre, konnten nicht alle Proben bis Bruch geprüft werden. Dieser Umstand führte auch zu Verzögerungen in der Untersuchung der Schadensmechanismen bei Zeitstandversuchen.



7 Publikationen und Patente

7.1 Im Rahmen des Projektes entstandene Publikationen

7.1.1 Begutachtete Publikationen

Das Projekt soll im Rahmen der ASME Turbo Expo im Juni 2014 mit dem Titel "Mechanical behavior of dissimilar welds for steam turbine rotors with high application temperature" publiziert werden.

Ebenfalls ist eine Publikation der Ergebnisse in der "VGB Kraftwerkstechnik" geplant.

7.1.2 Nicht-begutachtete Publikationen

Das Projekt soll im Rahmen des MPA-Seminars 2014 publiziert werden, voraussichtlich mit dem Titel "Hochtemperaturverhalten von Mischschweißverbindungen für Turbinenwellen".

7.2 Gemeinsame Publikationen zweier oder mehrerer KW21 Teilprojekte

Im Rahmen des Projekts entstanden keine gemeinsamen Publikationen mit anderen KW21-Teilprojekten.

7.3 Weitere Publikationen

[AVI05]	Forschungsvorhaben AVIF A 130: "Neue Rohrwerkstoffe für Dampferzeuger mit Wirkungsgraden über 50%", Abschlussbericht MPA Stuttgart, 2005
[BAU09]	Bauer, M.: "Lebensdaueroptimierung von Schweißverbindungen mar- tensitischer Stähle für Hochtemperaturanwendungen", Dissertation, Universität Stuttgart, 2009
[CER07]	Cerjak, H. und P. Mayr: "Zum Einfluss des Schweißens auf das Kriechverhalten moderner Stähle", Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 38, No. 7, S. 511 ff., 2007
[GOE04]	Götz, G.: "Langzeitentwicklung der Mikrostruktur neuer 9-12%-Chromstähle für den Einsatz in Kraftwerken", Dissertation, Universität Erlagen, 2004
[IEA09]	International Energy Agency: "World Energy Outlook 2009", Paris, 2009
[IEA12]	International Energy Agency: "World Energy Outlook 2012 Factsheet", Wien, 2012
[KER05]	Kern, TU.: "Material Research and Development Challenges for Low $\rm CO_2$, High Efficient Steam Turbines with Advanced Technology", Leipzig, 2005
[KW2109]	Forschungsinitiative Kraftwerke des 21. Jahrhunderts, Phase I: Bewer- tung von Schweißverbindungen im Turbomaschinenbau, Abschlussbe- richt MPA Stuttgart, 2009



[LUE10]	Lückemeyer, N., et al.: Determination of Material Behavior in 700°C Turbine Components under Component and Load Specific Conditions, MPA-Seminar, Stuttgart, 2010
[MAY07]	Mayr, P.: "Evolution of microstructure and mechanical properties of the heat affected zone in B-containing 9% chromium steels", Dissertation, TU Graz, 2007
[RAU06]	Rauch, M.: "Entwicklung eines Lebensdauerkonzeptes für Schaufel- Welle-Verbindungen stationärer Turbinen aus Nickelbasis- und 10 %-Chromlegierungen", Dissertation, Universität Stuttgart, 2006
[SCA04]	Scarlin, B. et al.: "Materials developments for ultrasupercritical steam turbines", Fourth International Conference on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants, Hilton Head Island, SC, USA, 2004
[SCHW04]	Schwienheer, M.: "Statisches und zyklisches Hochtemperaturverhalten der 600°C-Dampfturbinenstähle (G)X12CrMoWVNbN10-1-1", Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2004
[SCHO04]	Schönfeld, K. H. et al.: "Superalloy Forgings for Advanced High Temperature Power Plants", Fourth International Conference on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants, Hilton Head Island, SC, USA, 2004
[VIS09]	Viswanathan, R., et al.: "Advanced Materials for Use Ultrasupercritical Coal Power Plants", 2009 Symposium on Advanced Power Plant heat resistant Steels and Alloys, Shanghai, 2009

7.4 Im Rahmen des Projektes entstandene Patente

Im Rahmen des Projekts wurde kein Patent angemeldet.

8 Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses

8.1 Studentische Mitarbeiter

Im Rahmen des Projekts wurden keine studentischen Mitarbeiter eingesetzt.

8.2 Studien-, Semester- und Bachelorarbeiten

U. Elsasser, M. Schän	zel, C. Pfister, F. Chao, C. Tianxiang, H. Künzel Projektarbeit "Fraktographische Untersuchungen an (Warm-) Zugversuchproben einer Mischschweißverbindung"
V. Traa, M. Kopf, S. G	essert, P. Scheckenbach Projektarbeit "Untersuchungen zum Verhalten von Mischschweiß- verbindungen"
M. Kammerer	Modellierung des Kriechverhaltens der Wärmeeinflusszone eines modernen 10%-Chromstahls



- F. König Modellierung des Kriechverhaltens der Nickelbasissuperlegierung Inconel Alloy 625
- A. Lehmann Simulation der Mehrlagenschweißung einer Turbinenwelle und des daraus resultierenden Eigenspannungszustandes

8.3 Diplom- und Masterarbeiten

Im Rahmen des Projekts wurden keine Diplom- und Masterarbeiten durchgeführt.

8.4 Promotionen

Das Projekt soll zur Promotion von Dipl.-Ing. Stefan Krojer, M.S. (The George Washington University, Washington, DC, USA) führen; voraussichtlicher Titel der Arbeit: "Hochtemperaturverhalten von Mischschweißverbindungen in Turbinenwellen für das 700°C-Kraftwerk"

9 Forschungsprogramme des Bundes und der EU

9.1 Angaben, ob weitere Drittmittel zum Projektthema eingeworben wurden, insbesondere aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen des Bundes und der EU

Für das Projekt wurden keine weiteren Drittmittel eingeworben.

9.2 Geplante Antragsstellung bzw. künftige Förderung aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen von Bund, EU etc. sowie allgemeinen Förderprogrammen (z.B. DFG)

"Erweiterte Werkstoff- und Lebensdauerkonzepte auf Basis komplexer Versuche", Forschungsprojekt im Rahmen der Förderinitiative COORETEC, AG 1 Hocheffizientes Dampfkraftwerk und Cooretec Turbo 2020



Arbeitskreis Fluiddynamik und Dampfturbine

Projekt: BW W 31DT

Temperaturabhängiges Verhalten von hochbeanspruchten Bauteilen im Turbomaschinenbau mit ungleichartigen Nickelbasis-Schweißverbindungen

Projektleiter:	Prof. DrIng. Eberhard Roos Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart
Mitarbeiter:	DiplIng. Magdalena Speicher
	DiplIng. Stefan Krojer, M.S. (The George Washington University, Washington, DC, USA)
	DrIng. Andreas Klenk
Finanzierung:	Siemens AG, Energy Sector

1 Ausgangssituation

In den vergangenen Jahrzehnten wurde ein kontinuierlicher Anstieg des Energiebedarfs beobachtet. Abbildung 1 zeigt den Anstieg des weltweiten Verbrauchs an elektrischer Energie aus dem World Energy Outlook von 2009 [IEA09]. Der World Energy Outlook von 2012 geht davon aus, dass der Bedarf an elektrischer Energie bis 2035 um ca. 70 % auf rund 32000 TWh anwachsen wird, wobei über die Hälfte dieses Anstiegs auf Indien und China fällt [IEA12].





Abbildung 1: Weltenergieverbrauch bis 2035 [IEA09, IEA12]

Trotz eines anteiligen Rückgangs am weltweiten Energiemix wird Kohle weiterhin das wichtigste Standbein der globalen Energieerzeugung darstellen, insbesondere in nicht-OECD-Ländern [IEA12]. Gleichzeitig werden jedoch die leicht zugänglichen Ressourcen immer knapper und es müssen immer größere Anstrengungen unternommen werden, um diese Ressourcen weiter fördern zu können. Die aufwendige Förderung speziell von fossilen Brennstoffen hat schließlich sowohl ökonomische als auch ökologische Folgen.

Dem steigenden Energiebedarf stehen also eine Verknappung der zugänglichen Ressourcen, wirtschaftliche Interessen der Energieerzeuger und ein wachsendes Umweltbewusstsein der Bevölkerung gegenüber. Aus diesem Grund ist es zwingend erforderlich, Technologien zu entwickeln, die einerseits zur ressourcenschonenden Energieerzeugung beitragen und somit Kosten sparen und andererseits die Belastung für die Umwelt senken.

Die Erhöhung der Effizienz in fossil befeuerten Kraftwerken zur ressourcenschonenden Energieerzeugung kann durch mehrere Verbesserungsansätze erreicht werden, unter anderem durch eine Optimierung des Heizzyklus und eine Verbesserung der Strömungsverhältnisse. Ein wesentliches Optimierungspotenzial liegt in der Erhöhung der Parameter Dampftemperatur und Dampfdruck, was die Grundlage des hier vorliegenden Forschungsvorhabens darstellt. Experten sind sich einig, dass der Gesamtwirkungsgrad dieser Kraftwerke durch ein Zusammenwirken aller Potenziale auf über 50% gesteigert werden kann [LUE10, AVI05, KW2109].

Die Steigerung der Dampfparameter Druck und Temperatur erfordert den Einsatz neuartiger, hochwarmfester Werkstoffe wie beispielsweise der Nickelbasiswerkstoffe Alloy 617 oder Alloy 625. Bisher eingesetzte 912%Chromstähle erreichen bei etwa 600°C die Grenze ihrer Einsetzbarkeit und können daher nicht für Turbinenwellen im Betriebsbereich von Temperaturen bis zu 720°C verwendet werden [SCHW04, GOE04 RAU06].

Der Einsatz von Nickelbasis-Superlegierungen ist jedoch mit technischen und wirtschaftlichen Schwierigkeiten verbunden. So sind die Kosten für diese Legierungen um ein Viel-



faches höher als die Kosten für konventionelle 9-12%-Chromstähle. Auf Grund der großen Belastungen, die während des Betriebs auf eine Turbinenwelle wirken, insbesondere der Rotationskräfte, müssen die mechanischen Eigenschaften sehr gut beherrschbar sein, was ein Schmieden des Bauteils erfordert. Hierbei muss beachtet werden, dass die Formgebung der Superlegierungen, wie beispielsweise beim Schmieden, auf Grund ihrer guten Temperatureigenschaften nur mit hohem materiellen und finanziellen Mehraufwand durchzuführen ist. Die Herstellung der Turbinenwelle durch Gießen ist technologisch in diesen Abmessungen auch wegen der nicht einfach zu beherrschenden Korngröße und -orientierung in den meisten Fällen nicht möglich. Auch die zerstörungsfreien Prüfmethoden stoßen bei austenitischen Werkstoffen oft an ihre Grenzen. Es ist also wirtschaftlich nicht sinnvoll und technologisch nicht möglich, Turbinenrotoren vollständig aus einer Nickelbasis-Superlegierung herzustellen.

Daher soll der Einsatz der Nickelbasis-Werkstoffe auf die Bereiche beschränkt werden, in denen konventionelle Hochtemperaturwerkstoffe einen Betrieb mit ausreichender Sicherheit nicht garantieren können. Für die Bereiche niedrigerer Temperaturen kann auf die bewährten 912%-Chromstähle zurückgegriffen werden. Die Verbindung der beiden Werkstoffe wird durch eine Schweißung realisiert, wie in Abbildung 2 schematisch dargestellt ist. Somit ist zusätzlich die Schweißeignung der Grundwerkstoffe zu einer ungleichartigen Schweißung sicherzustellen.





Abbildung 2: Temperaturverteilung der Turbinenwelle und Einsatz der Werkstoffe (schematisch)

Um die Herausforderung der Temperatur- und Drucksteigerung zu bewältigen, wurde bereits vor rund fünfzehn Jahren damit begonnen, geeignete Werkstoffe für den Betrieb eines AUSC-Kraftwerks ("Advanced UltraSupercritical") zu qualifizieren. Die meisten der untersuchten Werkstoffe werden bereits seit längerer Zeit eingesetzt, jedoch in wesentlich kleineren Dimensionen und kürzeren Lebensdauern als dies für eine Dampfturbine erforderlich ist [VIS09]. Folglich wurden technologische und wirtschaftliche Faktoren für Bauteile mit großen Abmessungen untersucht, so z. B. die Schweißeignung, die Eignung zur zerstörungsfreien Prüfung oder die Herstellkosten. Zusätzlich wurden die Materialien in der engeren Auswahl auf das Verhalten bei rissbehafteten Bauteilen, unter Kriechen und Relaxation, hoch- und niederzyklischer Ermüdung (HCF bzw. LCF), und die Warmzugeigenschaften untersucht. Die Entscheidung für die zielgerichtete weitere Untersuchung fiel schließlich auf die Nickelbasislegierungen Alloy 617 und Alloy 625 [KER05, SCA04, SCH004]. Diese beiden Werkstoffe bilden daher auch die Grundlage für das hier vorliegende Forschungsvorhaben.



Die Entstehung von Fehlern in Schweißnähten kann trotz ständigen technologischen Fortschritts nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Zudem werden die Werkstoffeigenschaften des Grundwerkstoffs in unmittelbarer Nähe der Schweißnaht durch den Schweißprozess verändert. Eine Übersicht über die Beeinflussung des Grundwerkstoffs im Bereich der Schweißverbindung ist in Abbildung 3 gegeben. Speziell im Einsatz bei hohen Temperaturen stellt der beeinflusste Grundwerkstoff in unmittelbarer Nähe der Schweißnaht, die sogenannte Wärmeeinflusszone, häufig den versagenskritischen Bereich dar [MAY07]. Daher ist eine genaue Untersuchung des Schweißbereichs für unterschiedliche Werkstoffkombinationen, wie sie in Turbinenwellen eingesetzt werden können, unerlässlich.



Abbildung 3: Gefügeveränderung im Bereich der Schweißnaht [BAU09]

Grobes Korn, wie es in der Grobkornzone oder WEZ 1 vorliegt, siehe Abbildung 3, kann sprödes Versagen begünstigen und die Festigkeits- und Verformungseigenschaften bei Warmzug- und LCF-Versuchen, in denen plastische Verformungen auftreten, verringern. Grobes Korn wirkt sich jedoch beispielsweise bei Zeitstandbeanspruchung vorteilhaft aus. Feines Korn, wie es in der Feinkornzone (WEZ 2) oder der interkritischen Zone (WEZ 3) vorliegt, kann zu früherem Versagen bei rissbehafteten Bauteilen oder bei Zeitstandbeanspruchung führen [CER07]. Zudem können Bindefehler, Diffusion, Einschlüsse oder Heißrisse im Schweißgut zu weiteren Schäden führen. Je nach Beanspruchungsart stellen also verschiedene Bereiche der Schweißnaht bzw. der Wärmeeinflusszone Schwachstelen der Verbindung dar. Diese gilt es genau zu identifizieren, um eine sichere Auslegung der Turbinenwelle gewährleisten zu können.

Zur Versuchsauslegung kann auf erste Erkenntnisse zum Verhalten von ungleichartigen Schweißverbindungen unter verschiedenen Beanspruchungszuständen zurückgegriffen werden, die in Phase I der Forschungsinitiative "Kraftwerke des 21. Jahrhunderts" gewonnen worden sind. Dabei wurde eine Verbindung aus einer Nickelbasis-Superlegierung und einem konventionellen 10%-Chromstahl untersucht.

Insbesondere wurden in Phase I bei langlaufenden, quasistatisch beanspruchten Proben, sehr verformungsarme Brüche in der Schmelzlinie, d.h. dem Übergang vom Schweißgut zum Chromstahl, festgestellt. Beispielhaft ist in Abbildung 4 die Bruchfläche einer Zeit-



standprobe bei T = 550 °C und σ = 245 MPa dargestellt. Rechts ist der Bruch in der Fusionslinie mit den Konturen der einzelnen Schweißlagen erkennbar, links der Restbruch in der Wärmeeinflusszone des 10 %-Chromstahls.



Abbildung 4: Bruchfläche einer Zeitstandprobe aus KW 21 Phase I

Versuche unter zyklischer Beanspruchung konnten die Schmelzlinie als vorherrschend versagenskritische Zone nicht bestätigen. Während die zyklischen Versuche bei Raumtemperatur im Alloy-Grundwerkstoff versagten, trat das Versagen bei erhöhter Temperatur überwiegend im Grundwerkstoff des 10 %-Chromstahls auf.

Auf Basis dieser Erkenntnisse erfolgt für das vorliegende Projekt eine Variation der eingesetzten Werkstoffe. Einerseits wird im Rahmen einer Versuchs-Rotorschweißverbindung ein anderer 10 %-Chromstahl eingesetzt als in Phase I, andererseits werden im Rahmen von drei Versuchs-Blockschweißverbindungen das eingesetzte Schweißgut und der Schweißnahtaufbau sowie der Alloy-Grundwerkstoff variiert, um den Einfluss dieser Faktoren auf das Verhalten der Schweißnaht in den quasistatischen Versuchen untersuchen zu können. Zusätzlich ist es erforderlich, die Ergebnisse der zyklischen Versuche aus Phase I an einer ausgewählten Verbindung zu bestätigen.

2 Projektziele

Ziel des Vorhabens ist die Ermittlung des temperaturabhängigen Verhaltens der Schweißverbindung einer Nickelbasislegierung an einen 10 %-Chromstahl mit experimentellen und numerischen Methoden. Wichtig ist dabei die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Bauteilgeometrie. Insbesondere soll die Schweißnaht im Ausgangszustand untersucht und mechanische Kennwerte in quasistatischen und zyklischen Versuchen über den gesamten Einsatztemperaturbereich ermittelt werden. Die ermittelten Kennwerte werden in geeignete Materialmodelle zur Beschreibung der Schweißnaht umgesetzt. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen unmittelbar in die Weiterentwicklung von Berechnung- und Bewertungsvorschriften einfließen.



2.1 Umsetzung der Hinweise aus den bisherigen Begutachtungen

Bei der Zwischenbegutachtung 2011 wurde lediglich der Teil BW L 31DT begutachtet. Die Hinweise aus der Zwischenbegutachtung wurden aber auch für das Projekt BW W 31DT berücksichtigt.

3 Vernetzung

3.1 Vernetzung innerhalb KW21

Die Erkenntnisse aus dem Projekt können auch für andere Bereiche des Kraftwerks verwendet werden, in denen Hochtemperaturwerkstoffe eingesetzt werden, wie beispielsweise den Dampferzeugern. Zwar gilt das Hauptinteresse des Projekts der Untersuchung der Schweißverbindung für einen Turbinenrotor, jedoch existieren in vielen Bereichen eines Kraftwerks geschweißte Komponenten, die hohen Temperaturen und mechanischen Belastungen ausgesetzt sind.

Innerhalb der Forschungsinitiative KW21 Phase II war eine direkte Vernetzung mit anderen Teilprojekten jedoch nicht gegeben. Zwar befassten sich die Projekte BWW L 29DE und BY 11GT ebenfalls mit Nickelbasiswerkstoffen bzw. artgleichen Schweißverbindungen dieser Werkstoffe. Da die Nickelbasisseite sich im Projekt BWW L 31DT jedoch als nicht versagenskritisch herausstellte, konnten daraus nur wenige Synergieeffekte erzielt werden.

3.2 Vernetzung außerhalb KW21

Die Untersuchung von Mischverbindungen ist seit mehreren Jahren ein auf breiter Basis untersuchtes Forschungsgebiet. So wurden beispielsweise im Projekt "Verhalten von optimierten Werkstoffen und Werkstoffverbunden für 700-720 °C-Dampfturbinenbauteile" (COORETEC DT3) ungleichartige Schweißverbindungen aus einem 2 %-Chromstahl und einer Nickelbasislegierung untersucht. Projekte wie "Werkstoffqualifizierung für das 700/720 °C-Kraftwerk" (AVIF A 215) oder "Optimierung der Schweißverbindung zur Verhinderung des vorzeitigen Kriechversagens in der Wärmeeinflusszone über die gezielte Festigkeitsauswahl des Schweißgutes" (AVIF A 221) tragen zum besseren Verständnis der Ausbildung einer Wärmeeinflusszone und deren Verhalten im Hochtemperaturbereich bei.

4 Vorgehensweise und Methodik

Zunächst erfolgte für die erste Versuchsschweißverbindung, einer Rotorschweißverbindung aus einem wolframfreien 10 %-Chromstahl und der Nickelbasissuperlegierung Alloy 625, eine metallographische Untersuchung des Ausgangszustands. Dabei wurde eine Schädigung der Wärmeeinflusszone festgestellt, die bei der Wärmenachbehandlung aufgetreten war. Aus diesem Grund wurden drei Blockschweißverbindungen nachgeliefert. Als Grundwerkstoffe wurden dafür ein wolframlegierter 10 %-Chromstahl sowie die Nickelbasissuperlegierungen Alloy 617 bzw. Alloy 625 eingesetzt. Im Vergleich zur Rotorschweißverbindung wurde für die Blockschweißverbindungen ein anderes Schweißgut verwendet und Variationen im Schweißnahtaufbau vorgenommen. Der herstellungsbe-



dingte Schaden in der Rotorschweißverbindung sowie die Zusatzlieferung der Blockschweißverbindungen erforderten eine Anpassung des ursprünglichen Versuchsplans.

Zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften der Schweißverbindungen werden nach der Überprüfung der Schweißnaht im Lichtmikroskop verschiedene Versuche durchgeführt. Für alle zu untersuchenden Verbindungen werden Zug- und Zeitstandversuche zur Beschreibung des quasistatischen Verhaltens gefahren. Besonders der Zeitstandversuch besitzt auf Grund der langen Lebensdauer einer Turbinenwelle große Aussagekraft zur Einsetzbarkeit der untersuchten Verbindungen. Im Betrieb wirken aber auch zyklische Lasten auf die Turbinenwelle. Daher muss untersucht werden, unter welchen Bedingungen Versagen im Bereich der Schweißnaht auftritt. Dies wird über last- und dehnungskontrollierte Versuche realisiert.

Sobald sich ein Anriss gebildet hat, muss eine Abschätzung möglich sein, wie lange ein sicherer Betrieb des Bauteils trotz des Risses noch möglich ist. Aus diesem Grund werden auch Bruchmechanikversuche durchgeführt. Diese dienen der Ermittlung des Schwellwerts, d.h. ab welcher Beanspruchung ein Riss sich ausbreitet, sowie der Bestimmung des zyklischen Risswachstums.

Im Anschluss an die Experimente sollen die Ergebnisse der quasistatischen Untersuchungen mit Hilfe numerischen Methoden nachgerechnet und Materialmodelle validiert werden.

Auf Basis der Erkenntnisse aus den experimentellen und numerischen Untersuchungen werden zuletzt die Berechnungs- und Bewertungsmethoden entsprechend angepasst.

5 Projektergebnisse und Ausblick

Im folgenden Abschnitt werden die Projektergebnisse vorgestellt. Dabei werden die drei Blockschweißverbindungen mit BSV1, BSV2 und BSV3 bezeichnet.

5.1 Charakterisierung im Ausgangszustand

Zunächst erfolgt für die Verbindungen eine lichtmikroskopische Charakterisierung des Ausgangszustands, um eventuelle Schweißfehler zu identifizieren. Für die Blockschweißverbindungen liegen keine Befunde vor, für die Rotorschweißverbindung verursachte die Wärmenachbehandlung einen Riss in der Wärmeeinflusszone des 10 %-Chromstahls. Abbildung 5 zeigt für die Blockschweißverbindungen Schliffbilder aus dem Bereich der Mitte der Schweißnaht, für die Rotorschweißverbindung den geschädigten Teil im Bereich der Decklage der Schweißnaht. Deutlich zu erkennen ist jeweils der angeätzte 10 %-Chromstahl auf der linken Seite. Unter den Schliffbildern ist der jeweilige Härteverlauf HV1 für die Verbindung dargestellt.





Abbildung 5: Übersicht der Schliffbilder der Schweißnaht mit den zugehörigen Härteprofilen

5.2 Zugversuche

Im Anschluss an die lichtoptische Untersuchung werden für die Blockschweißverbindungen je ein Zugversuch bei 20 °C, 450 °C und 550 °C durchgeführt, für die Rotorschweißverbindung wird aus dem metallographisch ungeschädigt erscheinenden Bereich eine Zugprobe für einen Versuch bei 550 °C entnommen. Zu beachten ist bei der Beurteilung der Versuchsergebnisse, dass der Festigkeitskennwert R_{p0,2} sowie der Verformungskennwert A von der Bezugsmesslänge und dem Versagensort abhängen. Erfolgt das Versagen im Grundwerkstoff, so ist davon auszugehen, dass sich die weiteren Grundwerkstoffbereiche bis zum Höchstlastpunkt ebenfalls plastisch verformen und somit eine höhere Bruchdehnung ermittelt wird, als wenn das Versagen lokal auf eine Stelle begrenzt ist. Die Festigkeits- und Verformungskennwerte der Untersuchung sind normiert auf die Werte der BSV3 in Abbildung 6 dargestellt.



Abbildung 6: Normierte Festigkeits- und Verformungskennwerte der untersuchten Schweißverbindungen

Die etwas höheren Bruchdehnungen für BSV2 bei 20 °C und 450 °C sind darauf zurückzuführen, dass bei diesen Proben das Versagen im Nickelbasis-Grundwerkstoff auftritt. Die übrigen Kennwerte liegen im normalen Streubereich. Die deutlich abweichende



Streckgrenze für die Rotorschweißverbindung bei 550 °C ist damit zu begründen, dass der Bereich plastischer Verformung auf eine sehr kleine Zone begrenzt ist und somit eine hohe Last aufgebracht werden muss, um eine plastische Dehnung von 0,2 % über die Gesamte Messlänge zu erreichen. Die Verformungskennwerte der Versuche bei 550 °C streuen deutlich mehr als bei niedrigeren Temperaturen. Dies ist auf den Übergang des Versagensortes in den Bereich es Übergangsgebiets vom Schweißgut in den 10 %-Chromstahl zurückzuführen.

5.3 Zeitstandversuche

Zeitstandversuche stellen eine der wichtigsten Untersuchungen für hochtemperaturbeanspruchte Bauteile mit langen Lebensdauern dar. Aus diesem Grund werden für alle vier Verbindungen Zeitstandversuche bei 550 °C durchgeführt. Bei der Rotorschweißverbindung wird wieder darauf geachtet, dass Proben aus einem Bereich der Schweißverbindung entnommen werden, an dem lichtoptisch keine Schädigung erkennbar ist.

Auf Basis der Versuchslaufzeiten bis zum Bruch ist es möglich, das Zeitstandverhalten der vier Verbindungen miteinander zu vergleichen. Abbildung 7 a) zeigt die Ergebnisse aus den Zeitstandversuchen bei 550 °C. Daraus geht hervor, dass sich die Zeitstandfestigkeit der Blockschweißverbindungen für die bisher gebrochenen Proben im Bereich des Streubands des 10 %-Chromstahls einordnet. Für den Bereich größer 10000 h ist mit einem Abfall der Zeitstandfestigkeit auf Grund der Wärmeeinflusszone zu rechnen [MAY07]. Die Rotorschweißverbindung hingegen erreicht in etwa die Laufzeiten der Mischverbindung, die in Phase I der Forschungsinitiative untersucht wurde und somit deutlich unter denen der Blockschweißverbindungen liegen. Ein weiterer wichtiger Vergleichspunkt ist die Verformungsfähigkeit, die der Werkstoff zum Versagenszeitpunkt noch aufweist. Abbildung 7 b) zeigt, dass die Blockschweißverbindungen auch in diesem Punkt der Verbindung aus Phase I überlegen sind.









b) Zeit-Dehnlinien 295 MPa, 550 °C

Abbildung 7: Zeitstandfestigkeitsschaubild und Zeit-Dehnlinien zum Vergleich der untersuchten Schweißverbindungen bei 550 °C

Für BSV3 sowie die Rotorschweißverbindung werden auch Versuche bei 600 °C durchgeführt. Auch aus der Auswertung dieser Versuche geht hervor, dass die Rotorschweißverbindung Zeitstandfestigkeiten im Bereich der untersuchten Verbindung aus Phase I



liegt und die Blockschweißverbindung deutlich bessere Zeitstandeigenschaften aufweist, Abbildung 8 a). Abbildung 8 b) verdeutlicht dies, da die Probe der BSV3 im Vergleich zu den beiden Rotorschweißverbindungen höher beansprucht ist aber dennoch eine wesentlich höhere Versuchsdauer bis Bruch aufweist. Die Verformungskennwerte der BSV3 liegen im Bereich der Rotorschweißverbindungen. Im Vergleich zu den Versuchen der BSV3 bei 550 °C nimmt die Verformbarkeit jedoch ab. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich das Versagen lokal auf die Wärmeeinflusszone konzentriert und sich somit die auf die gesamte Messlänge bezogene Dehnung verringert.

Vergleich der Zeitstandfestigkeiten bei T = 600 °C (aktueller Stand)



a) Zeitstandfestigkeitsschaubild 600 °C

b) Zeit-Dehnlinien 600 °C

Abbildung 8: Zeitstandfestigkeitsschaubild und Zeit-Dehnlinien zum Vergleich der untersuchten Schweißverbindungen bei 600 °C

5.4 HCF-Versuche

Zusätzlich zu den quasistatischen Versuchen werden für BSV3 auch zyklische Versuche gefahren, um Aussagen über das Schweißnahtverhalten bei schwingender Beanspruchung zu treffen. Dabei stellt die Charakterisierung der hochzyklischen Ermüdung (HCF) eine wichtige Grundlage für die dauerfeste Auslegung der Turbinenwelle dar. In diesen Untersuchungen muss auch der Einfluss der Mittelspannung auf die maximal ertragbare Spannungsamplitude berücksichtigt werden.

Die Versuchsergebnisse weisen ein großes Streuband auf, Abbildung 9. Bedingt ist dieses Streuband neben der für schwingende Beanspruchung typischen Streuung auch durch die Tatsache, dass das Versagen bei 20 °C und 550 °C im Schweißgut auftritt. Beim Schweißprozess kommt es immer zu Inhomogenitäten, die sich bei kleinen Proben unter zyklischer Beanspruchung häufig in der Form von Ausreißern im Wöhlerdiagramm widerspiegeln.

Deutlich erkennbar ist in Abbildung 9 a), dass BSV3 bei 20 °C im Vergleich zur Schweißnaht, die in Phase I untersucht wurde, niedrigere ertragbare Spannungsamplituden aufweist. Dies relativiert sich jedoch bei höheren Temperaturen, wie aus Abbildung 9 b) abzulesen ist. Bei 550 °C liegen die dauerfest ertragbaren Spannungsamplituden für BSV3 bereits auf ähnlichem Niveau wie die der Rotorschweißverbindung aus Phase I.





Abbildung 9: Zeitfestigkeiten für BSV3 bei 20 °C und 550 °C

5.5 LCF-Versuche

Neben der hochzyklischen Ermüdung können bei An- und Abfahrvorgängen auch kleine plastische Verformungen an der Turbinenwelle auftreten. Für diesen Fall muss gewährleistet sein, dass auch nach mehreren An- und Abfahrvorgängen kein Riss in der Welle auftritt. Aus diesem Grund werden Versuche zur niederzyklischen Ermüdung (LCF) durchgeführt. Dabei werden Proben beim Belasten sowohl im Zug- als auch im Druckbereich plastisch verformt. Ermittelt wird die Anzahl der Schwingspiele bis zur Bildung eines Anrisses. Abbildung 10 zeigt die Anrisskennlinien für BSV3 bei 450 °C und 550 °C.



Abbildung 10: Anrisskennlinien für BSV3 bei 450 °C und 550 °C

Aus den Versuchen bei 450 °C geht hervor, dass eine Haltezeit keinen erkennbaren Einfluss auf das Anrissverhalten der Verbindung hat, Abbildung 10 a). Diese Temperaturen sind noch zu niedrig, um unter Zugbeanspruchung Kriechen bei einem der eingesetzten Werkstoffe hervorzurufen. Bei 550 °C jedoch ist ein Einfluss der Haltezeit zu erkennen, Abbildung 10 b). Die Rotorschweißverbindung aus Phase I zeigt ähnliche Kennwerte.



Zur Bestimmung Anrisslastspielzahl werden die Werte der Minimal- und Maximalspannungen für jeden Lastzyklus aufgetragen, Abbildung 11 a). Um den Anriss zu detektieren definiert man ein Lastabfallkriterium, d.h. einen bestimmten prozentualen Abfall vom stabilisierten Zyklus. Trägt man für diesen Zyklus den Wert der maximalen Spannung und der maximalen Dehnung in ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm ein, so lässt sich daraus die zyklische Fließkurve ermitteln, Abbildung 11 b). Dadurch kann für einen Werkstoff oder eine Schweißverbindung im ver- oder entfestigten Zustand ermittelt werden, welche Fes



a) Minimal- und Maximalspannung

b) zyklische Fließkurve

Abbildung 11: Minimal- und Maximalspannung und zyklische Fließkurve

5.6 Bruchmechanikversuche

Bauteile können auch bei vorhandenen Rissen meist noch sicher betrieben werden. Dazu ist jedoch genaue Kenntnis über Rissbildungs- und Risswachstumsvorgänge notwendig. Aus diesem Grund werden auch zu diesem Punkt Untersuchungen durchgeführt.

Zum einen werden für eine Verbindung die Risse in die Wärmeeinflusszone auf der Nickelbasisseite eingebracht. Ein Vergleich mit Ergebnissen aus einer Untersuchung, bei der die Risse in der Wärmeeinflusszone auf der Seite des 10 %-Chromstahls lagen, zeigt, dass das Rissbildungs- und Risswachstumspotential für die Nickelbasisseite weniger stark ausgeprägt ist.

Für die Untersuchungen an der BSV3 wird der Riss in den Bereich der Schmelzlinie auf der 10 %-Chromstahlseite eingebracht, da die LCF-Versuche diese Zone für die Anrissbildung im untersuchten Temperaturbereich als versagenskritisch zeigen.

5.7 Numerische Simulation der Zeitstandversuche

Die experimentellen Zeitstandversuche werden mit numerischen Methoden nachgerechnet. Dazu werden zuerst Materialmodelle erstellt, angepasst und optimiert. Ein Vergleich der Versuchslaufzeiten der kurzlaufenden Versuche verdeutlicht, dass Simulation und Experiment sehr gut übereinstimmen. Das Materialmodell ist für den Fall des am längsten gelaufenen Experiments bei hohen Spannungen konservativ, Abbildung 12 a). Mit zunehmender Versuchsdauer erhöht sich die Spannung im Grundwerkstoff auf der Seite des 10 %-Chromstahls, bis dort schließlich Versagen auftritt, Abbildung 12 b). Der Versagensort stimmt auch mit dem im Experiment ermittelten Versagensort überein, Abbildung 13.





Abbildung 12: Vergleich von Simulation und Experiment und Entwicklung der Vergleichsspannung



Abbildung 13: Vergleich Bruchaussehen Experiment und Simulation

Auch für die Experimente mit niedrigerer Beanspruchung gibt es gute Übereinstimmung. Es bleibt abzuwarten, ob die Bruchzeit und die Verformungsfähigkeit für diese Experimente durch das aktuelle Materialmodell auch bei sehr langen Versuchszeiten noch hinreichend genau abgebildet werden können.

5.8 Ausblick

Die Blockschweißverbindungen zeigen deutlich bessere Zeitstandeigenschaften als die Rotorschweißverbindungen. Die Ergebnisse der zyklischen Untersuchungen deuten darauf hin, dass die Blockschweißverbindungen, für deren genauere Charakterisierung BSV3 ausgewählt wurde, zwar bei 20 °C schlechtere Eigenschaften aufweisen als die Rotorschweißverbindungen. Im Einsatztemperaturbereich bei 550 °C sind diese Unterschiede jedoch nicht mehr stark ausgeprägt. Daher gilt es, die Überlegenheit der Blockschweißverbindungen in langlaufenden Zeitstandversuchen abzusichern.

Anhand langlaufender Versuche müssen die Materialmodelle auch für den Langzeitbetrieb validiert werden. Ebenso muss die Anwendbarkeit der angepassten Berechnungs und Bewertungskonzepte dann noch einmal kritisch geprüft werden.



6 Wesentliche terminliche und inhaltliche Abweichungen zum Projektantrag

Für die Untersuchungen wurde zu Projektbeginn mit leichter zeitlicher Verzögerung eine Versuchsschweißverbindung bereitgestellt. Diese Verbindung wies jedoch bereits im Ausgangszustand eine Schädigung auf, welche die Durchführung der Versuche entsprechend dem ursprünglichen Versuchsplan unmöglich machte.

Aus diesem Grund wurden drei weitere Schweißverbindungen zur Verfügung gestellt. Dieser Umstand erforderte eine Überarbeitung des Versuchsplans, da nicht alle geplanten Versuche an allen Verbindungen durchgeführt werden konnten. Das Hauptaugenmerk wurde auf die Untersuchung quasistatischer Eigenschaften gelegt. Für eine ausgewählte Verbindung wurden aber wie geplant auch zyklische Versuche gefahren.

Diese nicht selbst verschuldeten Umstände erforderten eine kostenneutrale Verlängerung des Projekts über den ursprünglich geplanten Projektzeitraum hinaus.

Da sich die Eigenschaften der Zeitstandversuche als deutlich besser herausstellen als dies aus Phase I der Forschungsinitiative zu erwarten gewesen wäre, konnten nicht alle Proben bis Bruch geprüft werden.

7 Publikationen und Patente

7.1 Im Rahmen des Projektes entstandene Publikationen

7.1.1 Begutachtete Publikationen

Das Projekt soll im Rahmen der ASME Turbo Expo im Juni 2014 mit dem Titel "Mechanical behavior of dissimilar welds for steam turbine rotors with high application temperature" publiziert werden.

Ebenfalls ist eine Publikation der Ergebnisse in der "VGB Kraftwerkstechnik" geplant.

7.1.2 Nicht-begutachtete Publikationen

Das Projekt soll im Rahmen des MPA-Seminars 2014 publiziert werden, voraussichtlich mit dem Titel "Hochtemperaturverhalten von Mischschweißverbindungen für Turbinenwellen".

7.2 Gemeinsame Publikationen zweier oder mehrerer KW21 Teilprojekte

Im Rahmen des Projekts entstanden keine gemeinsamen Publikationen mit anderen KW21-Teilprojekten.



7.3 Weitere Publikationen

[AVI05]	Forschungsvorhaben AVIF A 130: "Neue Rohrwerkstoffe für Dampferzeuger mit Wirkungsgraden über 50%", Abschlussbericht MPA Stuttgart, 2005
[BAU09]	Bauer, M.: "Lebensdaueroptimierung von Schweißverbindungen mar- tensitischer Stähle für Hochtemperaturanwendungen", Dissertation, Universität Stuttgart, 2009
[CER07]	Cerjak, H. und P. Mayr: "Zum Einfluss des Schweißens auf das Kriechverhalten moderner Stähle", Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 38, No. 7, S. 511 ff., 2007
[GOE04]	Götz, G.: "Langzeitentwicklung der Mikrostruktur neuer 9-12%-Chrom- stähle für den Einsatz in Kraftwerken", Dissertation, Universität Erla- gen, 2004
[IEA09]	International Energy Agency: "World Energy Outlook 2009", Paris, 2009
[IEA12]	International Energy Agency: "World Energy Outlook 2012 Factsheet", Wien, 2012
[KER05]	Kern, TU.: "Material Research and Development Challenges for Low CO_2 , High Efficient Steam Turbines with Advanced Technology", Leipzig, 2005
[KW2109]	Forschungsinitiative Kraftwerke des 21. Jahrhunderts, Phase I: Bewer- tung von Schweißverbindungen im Turbomaschinenbau, Abschlussbe- richt MPA Stuttgart, 2009
[LUE10]	Lückemeyer, N., et al.: Determination of Material Behavior in 700°C Turbine Components under Component and Load Specific Conditions, MPA-Seminar, Stuttgart, 2010
[MAY07]	Mayr, P.: "Evolution of microstructure and mechanical properties of the heat affected zone in B-containing 9% chromium steels", Dissertation, TU Graz, 2007
[RAU06]	Rauch, M.: "Entwicklung eines Lebensdauerkonzeptes für Schaufel- Welle-Verbindungen stationärer Turbinen aus Nickelbasis- und 10 %- Chromlegierungen", Dissertation, Universität Stuttgart, 2006
[SCA04]	Scarlin, B. et al.: "Materials developments for ultrasupercritical steam turbines", Fourth International Conference on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants, Hilton Head Island, SC, USA, 2004
[SCHW04]	Schwienheer, M.: "Statisches und zyklisches Hochtemperaturverhalten der 600°C-Dampfturbinenstähle (G)X12CrMoWVNbN10-1-1", Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2004



[SCHO04]	Schönfeld, K. H. et al.: "Superalloy Forgings for Advanced High Tem- perature Power Plants", Fourth International Conference on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants, Hilton Head Island, SC, USA, 2004
[VIS09]	Viswanathan, R., et al.: "Advanced Materials for Use Ultrasupercritical Coal Power Plants", 2009 Symposium on Advanced Power Plant heat resistant Steels and Alloys, Shanghai, 2009

7.4 Im Rahmen des Projektes entstandene Patente

Im Rahmen des Projekts wurde kein Patent angemeldet.

8 Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses

8.1 Studentische Mitarbeiter

Im Rahmen des Projekts wurden keine studentischen Mitarbeiter eingesetzt.

8.2 Studien-, Semester- und Bachelorarbeiten

 U. Elsasser, M. Schänzel, C. Pfister, F. Chao, C. Tianxiang, H. Künzel Projektarbeit "Fraktographische Untersuchungen an (Warm-) Zugversuchproben einer Mischschweißverbindung"
 V. Traa, M. Kopf, S. Gessert, P. Scheckenbach Porjektarbeit "Untersuchungen zum Verhalten von Mischschweißverbindungen"

- M. Kammerer Modellierung des Kriechverhaltens der Wärmeeinflusszone eines modernen 10%-Chromstahls
- F. König Modellierung des Kriechverhaltens der Nickelbasis-Superlegierung Inconel Alloy 625
- A. Lehmann Simulation der Mehrlagenschweißung einer Turbinenwelle und des daraus resultierenden Eigenspannungszustandes

8.3 Diplom- und Masterarbeiten

Im Rahmen des Projekts wurden keine Diplom- und Masterarbeiten durchgeführt.

8.4 Promotionen

Das Projekt soll zur Promotion von Dipl.-Ing. Stefan Krojer, M.S. (The George Washington University, Washington, DC, USA) führen; voraussichtlicher Titel der Arbeit: "Hochtemperaturverhalten von Mischschweißverbindungen in Turbinenwellen für das 700°C-Kraftwerk"



9 Forschungsprogramme des Bundes und der EU

9.2 Angaben, ob weitere Drittmittel zum Projektthema eingeworben wurden, insbesondere aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen des Bundes und der EU

Für das Projekt wurden keine weiteren Drittmittel eingeworben.

9.3 Geplante Antragsstellung bzw. künftige Förderung aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen von Bund, EU etc. sowie allgemeinen Förderprogrammen (z.B. DFG)

"Erweiterte Werkstoff- und Lebensdauerkonzepte auf Basis komplexer Versuche", Forschungsprojekt im Rahmen der Förderinitiative COORETEC, AG 1 Hocheffizientes Dampfkraftwerk und Cooretec Turbo 2020



Arbeitskreis Fluiddynamik und Dampfturbine

Projekt: BW L 32DT

Tropfengrößeneinfluss auf Erosionsvorgänge

Projektleiter:	Prof. M. Casey, D.Phil. Institut für Thermische Strömungsmaschinen und Maschinenlaboratorium (ITSM), Universität Stuttgart
	Prof. Dr. rer. nat. Siegfried Schmauder Institut für Materialprüfung, Werkstoffkunde und Festigkeitslehre (IMWF) Universität Stuttgart
Mitarbeiter:	DrIng. Mansoor Ahmad (ITSM) Marijo Mlikota, mag. ing. mech. (IMWF)
Finanzierung:	Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg

1 Ausgangssituation

Infolge von Kondensation entstehen in den letzten Stufen von Niederdruck-Dampfturbinen feine Nebeltropfen mit Durchmessern von ca. 1 μ m. Diese werden teilweise von den Leitschaufeln aufgefangen, sodass sich ein Wasserfilm auf der Oberfläche der Leitschaufeln bildet. Das Wasser sammelt sich an der Hinterkante und reißt in Form von sog. Sekundärtropfen ab. Diese haben zunächst Durchmesser von bis zu 1500 μ m und bewegen sich im entsprechenden Schaufelnachlauf mit einer im Vergleich zur Dampfströmung niedrigen Geschwindigkeit. Aufgrund der dadurch auftretenden Scherkräfte werden die Sekundärtropfen nochmals in kleinere Tropfen mit Durchmessern von etwa 100 μ m zerrissen.

Da diese Tropfen beim Eintritt in den Laufschaufelkranz noch immer über eine vergleichsweise geringe Absolutgeschwindigkeit $c_{\rm Tr}$ verfügen, werden sie von den Laufschaufeln mit einer großen relativen Geschwindigkeit ($w_{\rm Tr} \approx 500$ m/s) erfasst, die nahezu der Umfangsgeschwindigkeit *u* der Schaufeln entspricht, vgl. Abbildung 1. Diese Tropfenaufschläge führen zu Materialschädigungen und Materialabtrag – der sog. Tropfenschlagerosion [16]. Neben festigkeitskritischen Schaufelschäden kommt es zu Wirkungsgradverlusten [9], [11], [15], [17]. Dass die Tropfengröße großen Einfluss auf die Erosion der Laufschaufeln in Niederdruck-Dampfturbinen hat, ist seit langem bekannt. So wurde bereits in den 1960er-Jahren in verschiedenen experimentellen Studien untersucht, welche Rolle der Tropfenschlag bei thermohydraulischen Strömungsmaschinen hinsichtlich Erosionsschädigung spielt [6], [12], [22].





Abbildung 1: Geschwindigkeitsdreiecke von Dampf und Tropfen (Abstand zwischen Leitrad und Laufrad überzeichnet)

Die Partikelpfade von Wassertropfen in Niederdruck-Dampfturbinen wurden in einer Studie am ITSM [21] untersucht. Dabei wurde zum einen die Verteilung der Tropfenablagerung von kleinen Nebeltropfen auf Leitschaufeln betrachtet. Zum anderen wurde auf Sekundärtropfen mit einem Durchmesser von ca. 150 µm eingegangen. Diese wurden an der Leitradhinterkante der Endstufe in das Strömungsfeld injiziert und die Flugbahnen mit Hilfe von Lagrange-Partikelpfadberechnungen simuliert. Die Orte des Auftreffens auf der Laufschaufel wurden mittels numerischer Simulation ermittelt. Daraus gingen jeweils ebenfalls die Aufprallgeschwindigkeiten hervor. Die sich ergebenden Aufschlagwinkel können abgeschätzt werden.

Um die Tropfenschlagerosion und deren Abhängigkeit von verschiedenen Parametern besser zu verstehen und um die Erosionsbeständigkeit von unterschiedlichen Werkstoffen zu untersuchen, wurde im Jahr 2002 ein bis dahin bei C.A. Parsons in Newcastle upon Tyne genutzter Erosionsversuchsstand an das Institut für Thermische Strömungsmaschinen und Maschinenlaboratorium (ITSM) der Universität Stuttgart gebracht und dort aufgebaut. Der Versuchsstand verfügt über zwei gegenläufige Rotoren, deren Drehzahl unabhängig voneinander eingestellt werden kann. Am ersten Rotor ist eine Scheibe angebracht, an deren äußerem Durchmesser sich vier neigbare Aufnahmen für Werkstoffproben befinden (Abbildung 2). Der zweite Rotor ist hohl gebohrt und an einen Wassertank angeschlossen. Das Wasser, das sich im Rotor befindet, wird aufgrund der Fliehkraft nach außen gedrückt und dabei durch zwei einander gegenüberliegende Düsen zerstäubt. Dabei wird die Tropfengröße durch den an den Düsen anliegenden Druck bestimmt. Dieser wiederum ist eine Funktion der Drehzahl. Durch den Aufbau mit gegenläufigen Rotoren lassen sich Auftreffgeschwindigkeiten von bis zu 660 m/s erreichen. Die Testvorrichtung befindet sich in einer Vakuumkammer, in der Absolutdrücke bis 100 mbar eingestellt werden können.





Abbildung 2: Gesamtansicht des Erosionsversuchsstands am ITSM (links), Detailansicht von Düse und Probenhalter (Mitte) sowie Geschwindigkeitsdreiecke der Wassertropfen an Düse und Prüfkörper

Standardmäßig wird die Erosionsbeständigkeit einzelner Werkstoffe über einen Zeitraum von 50 Stunden untersucht, indem die Werkstoffproben in fünfstündigen Zeitintervallen aus dem Versuchsstand entnommen, gereinigt und gewogen werden. Der Gewichtsverlust bezogen auf die Zeit wird als Erosionsrate R_e bezeichnet. Abbildung 3 zeigt beispielhaft Prüfkörper vor und nach einer Verweildauer von 50 Stunden im Erosionsversuchsstand.



Abbildung 3: Prüfkörper vor (links) und nach (rechts) einer Verweildauer von 50 Stunden im Erosionsversuchstand

Im Zuge der bisher durchgeführten Messungen am Versuchsstand wurde die Erosionsbeständigkeit von verschiedenen Stahl- und Titanlegierungen bei mehreren Tropfenaufschlaggeschwindigkeiten untersucht, wobei die Erosionsbeständigkeit von Titanlegierungen bei allen Versuchen besser war als die von Stahlwerkstoffen der gleichen Härte [1], [2], [3]. Im Rahmen einer Parameterstudie wurde gezeigt, dass die Erosionsrate R_e von der Aufschlaggeschwindigkeit der Tropfen abhängt. Diese Abhängigkeit kann durch das einfache Potenzgesetz $R_e \sim V^n$ näherungsweise beschrieben werden. Der Exponent *n* liegt für duktile Werkstoffe im Bereich von 4-6, während für spröde Werkstoffe Werte von 7-8 ermittelt wurden.



Tropfengrößeneinfluss auf Erosionsvorgänge

Zur Abschätzung des Erosionsverhaltens von Werkstoffen wurden weitere dimensionslose Parameter formuliert. Es zeigte sich jedoch, dass sich das Erosionsverhalten von verschiedenen Werkstoffgruppen, die sich durch ihren metallurgischen Aufbau unterscheiden, nicht aufgrund eines einzelnen Parameters einschätzen lässt. Vielmehr muss der Einfluss vieler Werkstoffeigenschaften wie beispielsweise Härte, Elastizität und Zähigkeit auf die Erosionseigenschaften eines Materials betrachtet werden. Aus diesem Grund ist eine genaue Vorhersage der Erosionsbeständigkeit von verschiedenen Werkstoffen derzeit nicht möglich.

Begleitend zu den experimentellen Arbeiten wurden kontinuumsmechanische Modelle zur numerischen Untersuchung der Erosion eingesetzt [8], [9], [15], [25], [28]. Bisher konnte aber weder experimentell noch numerisch ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Werkstoffeigenschaft und Erosionsgrad abgeleitet werden. Schädigungssimulationen werden heutzutage auf makroskopischer Ebene [19] sowie auf mikroskopischer Ebene [10] durchgeführt. Sie erlauben es, sowohl spröden als auch duktilen Rissfortschritt mit lokalen und nichtlokalen Schädigungsmodellen oder mit Kohäsivzonenmodellen zu berechnen [20]. Auf atomarer Ebene kann die Erosion mit Hilfe der Monte-Carlo(MC)-Methode simuliert werden [23]. Es liegen auch Modelle zur Simulation der Rissbildung bei wiederholter Impakt-Belastung vor [26]. Am IMWF liegen unterschiedliche Schädigungsmodelle (z. B. Rice&Tracey [18] und Rousselier [27]) vor, die es ermöglichen, den Einfluss von Werkstoffeigenschaften auf die Schädigung zu erfassen.

Um den Erosionsprozess auf makroskopischer Ebene mittels der Kontinuumsmechanik zu simulieren, bietet die Finite-Elemente-Methode (FEM) zwei vielversprechende Möglichkeiten.

Die erste basiert auf der Anwendung der Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) adaptiven Vernetzungstechnik (Abbildung 4, Mitte) und der ABAQUS-Benutzersubroutine UMESH-MOTION. Der Algorithmus der ALE adaptiven Vernetzungstechnik wird in der Erosionssimulation dazu verwendet, das Netz um einen Betrag entsprechend der berechneten Erosionstiefe zu verschieben. Die Erosionstiefe wird an jedem Knoten auf Grundlage der aus der Subroutine UMESHMOTION erhaltenen Erosionsrate berechnet. Ist diese erst einmal ermittelt, werden die Erosionstiefen aller Flächen in den adaptiven Vernetzungsalgorithmus zurückgegeben und angewandt. Die lokale Veränderung der Knoten besteht aus der Materialverformung und der Verschiebung aufgrund der Netzbewegung.

Die zweite Möglichkeit basiert auf der Element-Eliminierungsmethode (Abbildung 4, rechts). Dabei wird angenommen, dass die Schädigung durch eine progressive Verminderung der Steifigkeit des Werkstoffs charakterisiert ist, welche zu Materialversagen führt. Für jedes Inkrement und jedes Element werden Informationen zu bestimmten Ausgabevariablen der Elemente abgefragt. Erreicht oder übersteigt der erhaltene Wert das Schädigungskriterium, wird das Element aus dem Netz entfernt.





Abbildung 4: Links: Netz ohne Anwendung der ALE adaptiven Vernetzung. Mitte: Netz mit Anwendung der ALE adaptiven Vernetzung. Rechts: Netz nach Anwendung der Element-Eliminierungsmethode.

2 Projektziele

Das Ziel dieses Forschungsprojekts war daher die detaillierte Untersuchung des Einflusses der Tropfengröße auf die Erosion verschiedener Stahl- und Titanwerkstoffe. Ein weiteres Ziel dieser Untersuchungen bestand darin, eine verbesserte Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf die in Niederdruck-Dampfturbinen vorherrschenden Bedingungen zu ermöglichen. Die Variation der Tropfengröße sollte durch Verwendung unterschiedlicher Düsen im Versuchsstand erreicht werden. Die Tropfengrößen dieser Düsen sollten mit Hilfe aktueller Messtechnik kontrolliert werden.

Neben experimentellen Untersuchungen sollte das Erosionsverhalten der Turbinenschaufel auch numerisch unter Anwendung verschiedener Erosionsmodelle auf der Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM) untersucht werden. Die Vorgabe von Randbedingungen sollte auf Basis der experimentellen Untersuchungen (z. B. Tropfengröße und -geschwindigkeit) erfolgen. Der aus dem Tropfenschlag resultierende Aufpralldruck, seine Einwirkzeit und die davon betroffene Fläche sollten entsprechend der Literatur berechnet werden [24]. Um den Erosionswiderstand der Werkstoffe eindeutig zu bewerten, sollte versucht werden, dieses Phänomen mit einer oder mehreren mechanischen Eigenschaften in Beziehung zu setzen, wie beispielsweise der Härte, der Zugfestigkeit oder der Elastizität. Mehrere Autoren haben versucht, den Erosionswiderstand mit der Dauerfestigkeit zu korrelieren. Obwohl wiederholte Spannungsimpulse sowohl in Erosions- als auch in Ermüdungsphänomenen auftreten, konnte bislang die Dauerfestigkeit nicht erfolgreich mit dem Erosionswiderstand in Beziehung gesetzt werden. Weitere Möglichkeiten für eine solche Verknüpfung sollten daher in diesem Projekt numerisch untersucht werden.

2.1 Umsetzung der Hinweise aus den bisherigen Begutachtungen

In der Zwischenbegutachtung wurde darauf hingewiesen, dass die Kenntnis der Tropfengröße für die experimentellen Untersuchungen im Rahmen des vorliegenden Projekts von großer Bedeutung ist. Deshalb wurden die beiden verwendeten Düsen (Bohrungsdurchmesser 1,5 mm und 1,7 mm) einer detaillierten Untersuchung unterzogen. Auf diese Weise konnte die in Abbildung 5 dargestellte Abhängigkeit des Sauter-Durchmessers von der Durchflussrate erarbeitet und in den folgenden Untersuchungen genutzt werden.



Tropfengrößeneinfluss auf Erosionsvorgänge

Die Gutachter wiesen außerdem darauf hin, dass keine Angaben zur Nachwuchsförderung gemacht wurden. Der vorliegende Abschlussbericht listet in Kapitel 8 die an den Untersuchungen beteiligten Studenten auf.



Abbildung 5: Mittlere Tropfendurchmesser in Abhängigkeit von der Durchflussrate für zwei Düsen mit Bohrungen von 1,5 und 1,7 mm Durchmesser

3 Vernetzung

3.1 Vernetzung innerhalb KW21

Die Kooperation zwischen den Instituten ITSM und IMWF im Rahmen dieses Projekts wurde erfolgreich umgesetzt. Die am ITSM gewonnenen experimentellen Ergebnisse werden zum einen zur Definition von Randbedingungen in den am IMWF durchgeführten FEM-Berechnungen genutzt (z. B. Tropfengröße und -geschwindigkeit). Zum anderen stehen Erosions-Zeit-Kurven bereit, die als Referenz zur Verifikation der numerischen Ergebnisse dienen.

Zudem erfolgte eine Zusammenarbeit mit dem am ITSM durchgeführten Projekt BW L 34DT "Tropfenpopulation in Niederdruck-Dampfturbinen". Insbesondere flossen die dort berechneten Strömungsdaten in die Erosionsbetrachtungen ein.

3.2 Vernetzung außerhalb KW21

Es wurden keine externen Kooperationen durchgeführt.



4 Vorgehensweise und Methodik

Obwohl der Effekt von Aufprallgeschwindigkeit und Auftreffwinkel auf die Erosion bereits in einer vorhergehenden Studie untersucht wurde, ist der Einfluss der Tropfengröße auf die Erosion immer noch nicht verstanden. Daher wurde eine Versuchsreihe durchgeführt, um den Einfluss der Tropfengröße auf den Erosionswiderstand zu erforschen. Verschiedene mögliche Kombinationen von Durchflussraten und Düsenbohrungen wurden eingestellt, sodass in verschiedenen Experimenten eine mittlere Tropfengröße von 100 µm bis zu 500 µm erreicht werden konnte.

Zusätzlich wurden numerische Untersuchungen unter Anwendung zweier verschiedener Finite-Elemente-Erosions-Modelle durchgeführt, um ein besseres Verständnis der Mechanismen zu erhalten, die mit der Tropfenschlagerosion an Turbinenschaufeln verbunden sind.

Das erste Erosionsmodell basiert auf der Anwendung der eingangs beschriebenen Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) adaptiven Vernetzungstechnik in Kombination mit der ABAQUS-Benutzersubroutine UMESHMOTION. Der Materialverlust wird durch die Netzverformung simuliert. Hierbei lässt sich die Größe der Netzverformung und damit des Materialverlusts (Erosion) mit Hilfe der Modellvariable VOLC steuern. Schließlich kann der in der Berechnung ermittelte Materialverlust mit dem experimentell bestimmten verglichen werden.

Das zweite Erosionsmodell basiert auf der Element-Eliminierungsmethode. Mit dieser Methode wird der Materialverlust durch Elimination von Elementen simuliert. Auch hier können die Ergebnisse der Simulationsrechnung und der Experimente anhand der Änderung der Oberflächengestalt verglichen werden.

5 Projektergebnisse und Ausblick

5.1 Experimentelle Ergebnisse

In den Experimenten wurden die drei Stahllegierungen X20Cr13, X5CrNiCuNb16-4 und X10CrNiMoV12-2-2 sowie die Titanlegierung Ti6Al4V untersucht. Hierbei erfolgten die Versuche mit Tropfen mit mittleren Durchmessern von 200 µm, 300 µm, 375 µm und 500 µm. Die Standardaufprallgeschwindigkeit von 488 m/s wurde in allen Experimenten beibehalten. Die Ergebnisse (Abbildung 6 bis 9) wurden anschließend mit den Ergebnissen eines Standardversuchs bei einer mittleren Tropfengröße von 100 µm verglichen. Da alle Versuche mit unterschiedlichen Durchflussraten durchgeführt wurden, geschieht der Vergleich der Ergebnisse auf Basis der Anzahl auftreffender Tropfen anstelle auf Basis der Versuchszeit.

Entsprechend den experimentellen Ergebnissen nimmt die Erosion mit zunehmender Tropfengröße zu (Abbildung 6 bis 9). Der Erosionswiderstand der untersuchten Werkstoffe kann ebenfalls aus diesen Diagrammen entnommen werden, indem die Werkstoffe bei einer bestimmten Tropfengröße verglichen werden.

Der Einfluss der Tropfengröße auf die Erosion wird abgeschätzt, indem der experimentell bestimmte Volumenverlust pro einzelnem Tropfenaufprall für die Erstellung einer Korrelation verwendet wird. Es zeigt sich, dass der Volumenverlust durch einen einzelnen Trop-



Tropfengrößeneinfluss auf Erosionsvorgänge

fenaufprall mit steigender Tropfengröße D gemäß einem einfachen Potenzgesetz; Erosion $E_r \sim D_{impact}^n$ zunimmt, wobei der Wert von n für Dampfturbinenmaterialien zwischen 3,2 und 3,4 liegt (Abbildung 10). Der Wert von n stimmt gut mit dem einiger anderer Studien [6], [13] überein, die einen Wertebereich für n von 4 bis 5 finden. Der Wert des Exponenten n für verschiedene Materialien ist in Tabelle 1 aufgelistet, zusammen mit den Eigenschaften der untersuchten Werkstoffe. Um den Einfluss der Tropfengeschwindigkeit und -größe auf die Erosion zu vergleichen, beinhaltet Tabelle 1 ebenfalls die Exponenten für die Aufprallgeschwindigkeit, die in einer vorhergehenden Studie gefunden wurden [2].

Werkstoff	Dichte	Oberflächen- härte	E-Modul	Abhängigkeit der Erosion E_r , von der Aufprall- geschwindigkeit V_{impact} $E_r \sim V_{n1}^{n1}$	Abhängigkeit der Erosion E, von der Tropfengröße D_{impact} $E_r \sim D_{impact}^{n2}$
	[g/cm ³]	[HV-10]	[GPa]	n1	n2
X20Cr13	7,71	271	216	3,5	3,22
X5CrNiCuNb16-4	7,760	328	200	3,4	3,21
X10CrNiMoV12-2-2	7,82	337	210	-	3,28
Ti6Al4V	4,420	334	110	5,3	3,45

Tabelle 1: Details der im Prüfstand untersuchten Werkstoffe zusammen mit den Tropfengrößenexponenten n1 und n2

In diesem Zusammenhang ist es interessant festzustellen, dass eine Steigerung der Tropfengröße um den Faktor 5 (von 100 µm auf 500 µm) eine Verringerung der Tropfenanzahl um den Faktor 125 bewirkt: Wenn eine begrenzte Menge Wasser sich in Tropfen der Größe 100 µm oder 500 µm umwandelt, dann tritt bei 500 µm mehr Erosion auf, obwohl 125 mal weniger Tropfenaufschläge stattfinden, als bei 100 µm Tropfengröße. Mit anderen Worten: Ein einzelner 500 µm-Tropfen führt zu einer stärkeren Erosion als 125 Tropfen mit einem Durchmesser von 100 µm. Dieses experimentelle Ergebnis führt zu der Annahme einer Grenztropfengröße, ähnlich einer Grenzgeschwindigkeit, unterhalb der praktisch keine Erosion auftritt. Das ist in gewisser Weise ähnlich zur Werkstoffermüdung, bei der eine große Spannungsamplitude weniger Schwingspielzahlen bis zum Bruch benötigt als eine kleine Amplitude.





Abbildung 6: Erosionsverhalten von X20Cr13 bei unterschiedlichen Tropfengrößen bei einer Aufprallgeschwindigkeit von 488 m/s



Abbildung 7: Erosionsverhalten von X5CrNiCuNb16-4 bei unterschiedlichen Tropfengrößen bei einer Aufprallgeschwindigkeit von 488 m/s





Abbildung 8: Erosionsverhalten von X10CrNiMoV12-2-2 bei unterschiedlichen Tropfengrößen bei einer Aufprallgeschwindigkeit von 488 m/s



Abbildung 9: Erosionsverhalten von Ti6Al4V bei unterschiedlichen Tropfengrößen bei einer Aufprallgeschwindigkeit von 488 m/s




Abbildung 10: Einfluss des Tropfendurchmessers auf die Erosion zweier Schaufelwerkstoffe

Von den untersuchten Werkstoffen weist Ti6Al4V den höchsten Erosionswiderstand auf. Unter den hochfesten Stählen zeigt der Laserbehandelte X5CrNiCuNb 16-4 das günstigste Erosionsverhalten.

5.2 Numerische Ergebnisse

Es wird angenommen, dass innerhalb einer bestimmten Erosionsstufe der Materialverlust durch einen Tropfenaufschlag unabhängig von umliegenden Tropfenaufschlägen betrachtet werden kann. Aufgrund dieser Annahme werden Simulationen mit wiederholtem Tropfenaufschlag an der gleichen Stelle durchgeführt.

Zur Beschreibung des Aufpralls eines einzelnen Tropfens sind der maximale Druck, seine Dauer und die vom Druck betroffene Fläche die wichtigsten Eingabegrößen. Um den maximalen Druck des senkrechten Aufschlags zu berechnen, wird die Gleichung für den Wasserstoß nach de Haller (1933) herangezogen. Für die Tropfengröße (100 µm) und Tropfengeschwindigkeit (488 m/s) werden die Werte der experimentellen Untersuchung verwendet. Entsprechend den Berechnungen ist der Druck des Tropfenstoßes sehr hoch (700 MPa), die Dauer des Stoßes sehr kurz (5,6 ns) und der Durchmesser der vom maximalen Druck betroffenen Fläche beträgt 32,5 µm. Basierend auf diesen Randbedingungen werden die Simulationen durchgeführt.

5.2.1 Erosionsmodell I

Der Erosionsprozess wird durch Anwendung der ALE adaptiven Vernetzung simuliert. Abbildung 11 zeigt das Simulationsergebnis: Die Verschiebungen der Knoten, ausgelöst durch die Aufbringung externer Belastung, ist gleich der berechneten Erosionstiefe.





Abbildung 11: Verschiebungen ausgelöst durch wiederholten Tropfenschlag senkrecht zur Probenoberfläche (Erosionsmodell I)

Abbildung 11 zeigt, dass es mit dem Erosionsmodell I möglich ist, den Erosionsprozess bei Tropfenschlag zu simulieren. Die numerische Ermittlung der Erosionsraten zweier unterschiedlicher Materialien, X20Cr13 und Ti6Al4V, wird erreicht durch iteratives Anpassen der Simulationsparameter, sodass die numerischen Ergebnisse den experimentellen entsprechen. Allgemein wird die Erosion aktiviert, sobald ein vordefiniertes Kriterium erreicht ist. Im vorliegenden Fall wird das erste Auftreten einer plastischen Vergleichsdehnung von PEEQ_{crit} = 0,001 als Aktivierungskriterium der Erosion verwendet. Die Erosionsraten nach der Aktivierung sind als absoluter Wert definiert. Das erklärte Ziel, die Erosionsraten als Funktionen einer oder mehrerer Werkstoffeigenschaften zu definieren, konnte fast vollständig erreicht werden. Das linke Diagramm in Abbildung 12 zeigt die Aktivierung der Erosion, sobald das Kriterium erfüllt ist. Bemerkenswert ist, dass der waagrechte Verlauf der Kurve (keine Erosion), was der im Experiment beobachtbaren In-kubationszeit entspricht, ebenfalls über die Simulation abgebildet wird.



Abbildung 12: Links: Aktivierung der Erosion nach Erfüllen gewählter Kriterien. Rechts: Vergleich extrapolierter Simulationsergebnisse mit Ergebnissen des Experiments (Erosionsmodell I)



Werden die numerischen Ergebnisse der an die Inkubationszeit anschließenden Phase konstanter Erosionsrate auf eine große Anzahl auftreffender Tropfen extrapoliert (Abbildung 12, rechts) zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit dem Experiment. Erst mit Beginn der im Experiment sichtbaren fallenden Erosionsrate weichen die Ergebnisse deutlich voneinander ab.

Variable, welche den Erosionsprozess beeinflussen (Tropfengröße und -geschwindigkeit) wurden hier systematisch variiert, um die Auswirkung eines jeden Parameters unabhängig zu untersuchen. Im ersten Schritt wurde die Abhängigkeit vom Tropfendurchmesser bei konstanter Tropfengeschwindigkeit (v = 488 m/s) bestimmt. Dabei wurde der Tropfendurchmesser bei 90, 100 bzw. 110 µm gehalten, die Ergebnisse wurden miteinander verglichen. Im zweiten Schritt wurde der Einfluss der Tropfengeschwindigkeit untersucht. An dieser Stelle wurde die Tropfengröße bei 100 µm festgehalten und die Geschwindigkeit wurde auf 468, 488 und 508 m/s festgelegt. Die Eingangsdaten für die Tropfengröße und -geschwindigkeit sind empirisch basiert. Die Ergebnisse beider Parameterstudien lassen darauf schließen, dass eine Zunahme der genannten Parameter einen negativen Einfluss auf die Dauer der Inkubationszeit hat (siehe dazu Abbildung 13), d.h. die Erosion tritt in diesen Fällen wie erwartet früher ein.



Abbildung 13: Einfluss der a) Tropfengröße und b) der Tropfengeschwindigkeit auf die Dauer der Erosionsinkubationszeit.

Im Folgenden wird der Einfluss der Materialeigenschaften, unter Verwendung von Tropfenstandardvariablen (d = 100 μ m; v = 488 m/s), auf die Dauer der Erosionsinkubationszeit untersucht. Diese wurden mit Hilfe des Johnson-Cook-Modells (J-C-Modell) um bis zu jeweils 10 % um die bereits bekannten J-C-Materialparameter (A = 862 MPa, B = 331MPa, n = 0.34, m = 0.80) für die Titanlegierung Ti6Al4V variiert. Die erzielten Ergebnisse dieser Parameterstudie wurden miteinander verglichen: Abbildung 14 a) stellt den Einfluss der J-C-Fließgrenze A auf die Dauer der Inkubationszeit dar. Die abgebildeten Ergebnisse sind zu erwarten, da die plastische Vergleichsdehnung als das Erosionsaktivierungskriterium gewählt wurde¹. Unter sonst gleichen Bedingungen wird das Material für eine niedrigere Fließgrenze eher plastisch verformt, dementsprechend verkürzt sich auch die Inkubationszeit. Abbildung 14 b) verdeutlicht, dass der J-C-Exponent der thermischen Erweichung *m* die Dauer der Inkubationszeit positiv beeinflusst: Diese verlängert sich mit steigendem J-C-Exponent. Bei einer Variation des J-C-Kaltverfestigungskoeffizienten B bzw. des J-C-Kaltverfestigungsexponenten n konnte kein signifikanter Einfluss auf die Erosionsinkubationszeit nachgewiesen werden. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass diese beiden Parameter bei der anschließenden Phase mit konstanter Erosionsrate eine wichtige Rolle spielen.





Abbildung 14: Inkubationszeit als Funktion der J-C-Parameter: a) Einfluss der Fließgrenze A, b) Einfluss des J-C Exponenten der thermischen Erweichung m.

5.2.2 Erosionsmodell II

Das Erosionsmodell II ist bisher teilweise entwickelt. Ähnlich dem ersten Erosionsmodell, bei dem die erstmalig auftretende plastische Vergleichsdehnung von PEEQ_{crit} = 0,001 als Aktivierungskriterium für Erosion verwendet wird, stellt in diesem Modell der gleiche Wert das Kriterium für die Elimination von Elementen dar. Abbildung 15 zeigt die Ergebnisse, die bei Anwendung der Element-Eliminierungsmethode erzielt werden. Die Herausforderung des Modells besteht darin, die Druckbelastung P, welche zunächst auf ein Element wirkt, auf das darunter liegende Element bei Ausfall zu übertragen. An dieser Stelle besteht noch Verbesserungspotenzial, insbesondere im Hinblick auf die Automatisierung der Elementeliminierung.



Abbildung 15: Übertragung der Druckbelastung P unter den Elementlagen

6 Wesentliche terminliche und inhaltliche Abweichungen zum Projektantrag

Sowohl die experimentellen als auch die numerischen Untersuchungen sind abgeschlossen. Dabei konnten die experimentellen Untersuchungen ohne wesentliche terminliche oder inhaltliche Abweichungen zum Projektantrag durchgeführt werden.

Hinsichtlich des Simulationsteils des Projekts wurden die zu Beginn gesetzten ambitionierten Ziele vollständig erreicht. In den gegenwärtigen Simulationen wurde die Erosion in Abhängigkeit der plastischen Vergleichsdehnung untersucht. Es ist jedoch anzunehmen, dass die Erosion von weiteren Werkstoffparametern beeinflusst wird. Das Erosionsmodell



basierend auf der ALE adaptiven Vernetzungstechnik wurde entwickelt und ist anwendbar auf die Simulation des Erosionsprozesses, der von einer begrenzten Anzahl wiederholter Tropfenaufschläge verursacht wird. Um dennoch Vergleiche zwischen Simulation und experimentellen Ergebnissen vornehmen zu können, wurde die Extrapolationstechnik genutzt. Werden die numerischen Ergebnisse der an die Inkubationszeit anschließenden Phase konstanter Erosionsrate auf eine große Anzahl auftreffender Tropfen extrapoliert (Abbildung 12), rechts) zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment.

Die am Anfang des Projektes angestrebten Ziele wurden mit Hilfe von Parameterstudien bezüglich der Tropfengröße, der Tropfengeschwindigkeit und den J-C-Materialparametern, erreicht. Hierzu wurde das FE-Erosionsmodell I, basierend auf der Anwendung der Lagrange-Eulerschen adaptiven Vernetzungstechnik, verwendet. Die durchgeführten Studien zeigen, dass sowohl die Randbedingungen (z.B. Tropfengröße und -geschwindigkeit) als auch die Materialparameter (z.B. Fließgrenze) eine wichtige Rolle beim Erosionsprozess, insbesondere während der Inkubationszeit, spielen. Ein hohes Potential für die weitere Modellierung des Erosionsprozesses bietet das Modell II, basierend auf der Element-Eliminierungsmethode, da es die Möglichkeit eröffnet, die Riss- und Bruchentstehung mit Hilfe der Element-Eliminierung darzustellen. Weiterhin bietet dieses Modell die interessante Möglichkeit, den Einfluss des Gefüges (wie z. B. verschiedene Phasen oder Korngrößen) auf den Erosionsprozess zu untersuchen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass mit den hier vorgeschlagenen Modellen das Erosionsverhalten qualitativ gut beschrieben werden kann. Mit einer Weiterentwicklung des Modells II und einer Verbesserung der Schadenskriterien könnte der Einfluss zahlreicher Parameter (u. a. der Tropfengröße) auf den Erosionsprozess in Zukunft auch quantitativ beschrieben werden.

7 Publikationen und Patente

7.1 Im Rahmen des Projektes entstandene Publikationen

7.1.1 Begutachtete Publikationen

- [1] Ahmad, M.: Experimental assessment of droplet impact erosion of low-pressure steam turbine blades. Shaker Verlag Aachen (2009)
- [2] Ahmad, M.; Casey, M.; Sürken, N.: Experimental assessment of droplet impact erosion resistance of steam turbine blade materials. Wear (2009), Vol. 267, S. 1605–1618
- [3] Ahmad, M.; Sigg, R.; Casey, M.; Sürken, N.: Steam turbine blade erosion assessment using specimens with a blade-like profile. Proc. 8th Europ. Turbomachinery Conference, Graz, Austria (2009), S. 1125-1136
- [4] Mlikota, M.; Schmauder, S.; Weber, U.: The change to renewable energies needs improved conventional power plants: A better understanding of the influence of droplet size on erosion process. Proceeding for 2nd. German-Egyptian Workshop Renewable Energies, Smart Grid and Green ITC, Stuttgart, November 26 - 27, 2012, IBZ



7.1.2 Nicht-begutachtete Publikationen

[5] Ahmad, M.; Schatz, M.; Casey, M.: Experimental investigation of droplet size influence on low pressure steam turbine blade erosion, to be published

7.2 Gemeinsame Publikationen zweier oder mehrerer KW21 Teilprojekte

Publikationen sind im Rahmen dieses KW21 Teilprojektes nicht entstanden.

7.3 Weitere Publikationen

- [6] ASTM G73-98: Standard Practice for Liquid Impingement Erosion Testing (2005), S. 1-19
- [7] Bowden, F. P.; Brunton, J. H.: The Deformation of Solids by Liquid Impact at Supersonic Speeds, Proc. R. Soc. Lond. Series A, Math. Phys. Sci. (1961) Vol. 263(1315), S. 433–450,
- [8] Campos-Amezcua, A.; Gallegos-Muñoz, A.; Romero, C. A.; Mazur-Czerwiec, Z.; Campos-Amezcua, R.: Numerical investigation of the solid particle erosion rate in a steam turbine nozzle, Appl. Thermal Eng. (2007), Vol. 27, S. 2394–2403
- [9] Crane, R. I.: Droplet deposition in steam turbines, Proc. IMechE, Part C: J. Mech. Engrg. Science (2004), Vol. 218(8), S. 859–870
- [10] Drabek, T.; Böhm, H. J.: Micromechanical finite element analysis of metal matrix composites using nonlocal ductile failuremodels, Comp. Material Science (2005), Vol. 37, S. 29–36
- [11] Gardner, G. C.: Events Leading to Erosion in the Steam Turbine, Proc. IMechE (1963–1964), Vol. 178(1/23), S. 593–623,
- [12] Hancox, N. L.; Brunton, J. H.: The Erosion of Solids by the Repeated Impact of Liquid Drops, Proc. R. Soc. Lond. Series A, Math. Phys. Sci. (1966), Vol. 260(1110), S. 121–139
- [13] Hattori, H.: Effects of impact velocity and droplet size on liquid impingement erosion, International Symposium on the Ageing Management & Maintenance of Nuclear Power Plants (2010), S. 58-71
- [14] Heymann, F. J.: On the Shock Wave Velocity and Impact Pressure in High-Speed Liquid-Solid Impact, Trans. ASME, J. Basic Engrg. (1968), S. 400–402,
- [15] Heymann, F. J.: Liquid Impingement Erosion, ASM Handbook (1992), Vol. 18, S. 221–231
- [16] Lam, T.C.T.; Dewey, R.T.: A study of erosion on L-0 turbine stages, International Joint Power Generation Conference (2003)
- [17] Moore, M. J.; Langford, R. W.; Tipping, J. C.: Research at C.E.R.L. on turbine blade erosion, Proc. IMechE Conf. on Wet Steam, Bristol (1968), Vol. 182, SS. 61–68
- [18] Rice, J.R., Tracey, D. M.: On the ductile enlargement of voids in triaxial stress, fields, Journal of Mechanics and Physics of Solids (1996), S. 201-217



- [19] Samal, M. K.; Seidenfuss, M.; Roos, E.; Dutta, B. K.; Kushwaha, H. S.: Finite element formulation of a new nonlocal damage model, Finite Elements in Analysis and Design (2008), Vol. 44, S. 358–371
- [20] Scheider, I.; Schödel, I. M.; Schönfeld, W.; Brocks, W.: Modelling Crack Extension in Biaxially Loaded Panels, 11th International Conference on Fracture (2005), ed. Carpinteri
- [21] Sigg, R.; Casey, M. V.: Teilprojekt DT 4: Strömungsmechanische Berechnung von Endstufe und nachfolgendem Diffusor in einer Dampfturbine, Zwischeninformation über die baden-württembergischen Projekte der Forschungsinitiative Kraftwerke des 21. Jahrhunderts (2006)
- [22] Smith, A.: The influence of moisture on the efficiency of a one-third scale model low pressure steam turbine, Symposium on wet steam, London (1966), S. 39–49
- [23] Stephenson, D. J.; Nicholls, J. R.: Modelling erosive wear, Corrosion Science (1993), Vol. 35(5–8), S. 1015–1026
- [24] Thomas, G.P.; Brunton, J.H.: Drop impingement erosion of metals, Proc. Roy. Soc. Lond. (1970), Part A, Vol. 314, S. 549-565
- [25] Wang, Y.-F.; Yang, Z.-G.: Finite element model of erosive wear on ductile and brittle materials, Wear (2008), Vol. 265, S. 871–878
- [26] Wawrzynek, P.; Ingraffea, A.: FRANC2D: A Two Dimensional Crack Propagation Simulator, User's Guide, Version 3.1, Cornell Fracture Group (1993)
- [27] Weber, U.: Modellierung von Verformung und Schädigung in Werkstoffgefügen mit unterschiedlichen großen Teilchen und Wasserstoffeinfluss, Dissertation, Universität Stuttgart (2006)
- [28] Woytowitz, P. J.; Richman, R. H.: Modelling of damage from multiple impacts by spherical particles, Wear (1999), Vol. 233–235, S. 120–133

7.4 Im Rahmen des Projektes entstandene Patente

Patente sind im Rahmen dieses KW21 Teilprojektes nicht entstanden.

8 Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses

8.1 Studentische Mitarbeiter

J. Schleyer	Programmierung, Datenanalyse und Visualisierung von Simulationsergebnissen. (Ausbildungsziel: DiplIng. Maschinenwesen)
B. Muthuraman	Datenanalyse und Visualisierung von Simulationsergebnissen. (Ausbildungsziel: Master of Science Computational Mechanics of Materials and Structures)
D. Hermann	Unterstützung bei der Durchführung und Auswertung von Erosionsversuchen. (Ausbildungsziel: DiplIng.Technologiemanagement)



8.2 Studien-, Semester- und Bachelorarbeiten

Studien-, Semester- und Bachelorarbeiten sind im Rahmen dieses KW21-Teilprojektes nicht entstanden.

8.3 Diplom- und Masterarbeiten

Diplom- und Masterarbeiten sind im Rahmen dieses KW21 Teilprojektes nicht entstanden.

8.4 Promotionen

Promotionen sind im Rahmen dieses KW21 Teilprojektes nicht entstanden.

9 Forschungsprogramme des Bundes und der EU

9.1 Angaben, ob weitere Drittmittel zum Projektthema eingeworben wurden, insbesondere aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen des Bundes und der EU

Es wurden keine weiteren Drittmittel im Rahmen dieses KW21 Teilprojektes eingeworben.

9.2 Geplante Antragsstellung bzw. künftige Förderung aus kraftwerksrelevanten Forschungsprogrammen von Bund, EU etc. sowie allgemeinen Förderprogrammen (z.B. DFG)

Im gegenwärtig laufenden Projekt mit dem Titel "Maßgeschneiderte Werkstoffe gegen Kavitations-Erosion" (gefördert vom ZfES) werden die im vorliegenden Bericht beschriebenen Erosionsmodelle weiterentwickelt.