

Energieverfahrenstechnik*

Franz Mayinger**

Verfahrenstechnische Probleme treten im Laufe eines Energieumwandlungs-Prozesses auf bei der Energiebereitstellung in Form von fossilen, nuklearen oder auch alternativen Energieträgern, bei dem Betrieb von Energiewandlern wie z. B. Kraftwerken, Kohleveredelungsanlagen oder auch Apparaten zur Wasserstoffgewinnung sowie bei der Entsorgung von Abfall- und Schadstoffen dieser Umwandlungsanlagen. In Anlehnung an die Definition der Aufgabe der Verfahrenstechnik – nämlich Stoffumwandlung im industriellen Maßstab zu betreiben – kann man die Aufgabe der Energieverfahrenstechnik auf die Behandlung von Stoffen eingrenzen, die bei der Energieumwandlung, sei es nach konventionellen oder nach neuen Techniken, sei es als Energieträger, als Zwischenprodukt oder auch als unerwünschte Abfall- und Ballaststoffe, Verwendung finden und auftreten. Nach einem Überblick über die mögliche Vielfalt der Aufgaben der Energieverfahrenstechnik wird an einigen herausgegriffenen Beispielen der Stand der Technik kurz diskutiert. Schließlich wird der Versuch gemacht, eine gewisse Systematik in diese Aufgabenvielfalt zu bringen. Angesichts bereits laufender Aktivitäten scheint es angemessen und angebracht, das Aufgabengebiet der Energieverfahrenstechnik zumindest vorerst auf die Reststoffbehandlung – Abfall- und Ballaststoffe – bei verschiedenen Methoden der Energieumwandlung zu konzentrieren.

Energy process engineering. In the course of an energy transformation process engineering problems occur in connection with: the energy supply in the form of fossil, nuclear, or alternative sources; the operation of energy converters, such as power plant, coal processing plant, or equipment for hydrogen generation; and in disposal of waste and pollutant materials produced in these transformation plant. In analogy with the definition of the task of process engineering – i. e. transformation of materials on an industrial scale – the purpose of energy process engineering can be delineated as the treatment of materials which find application or occur in energy conversion, whether as energy sources, as intermediates, or as undesired waste or ballast materials. After surveying the possible variety of the tasks of energy process engineering, the article briefly discusses the present state of the art with the aid of selected examples. An attempt is then made to introduce some kind of system into this wide-ranging material. In view of current activities, it appears appropriate to first concentrate on the treatment of residual materials – waste and ballast – in various methods of energy conversion.

1 Energieverfahrenstechnik: Pleonasmus oder neues Arbeitsgebiet?

Energietechnik befaßt sich mit der Umwandlung von Energieformen von chemischer Reaktionsenthalpie oder nuklearer Energie über Wärme in mechanische und elektrische Energie oder nur in Wärme für Prozesse der Stoffumwandlung oder der Temperierung von Räumen. Aufgabe der Verfahrenstechnik ist es, Verfahren im industriellen Maßstab durchzuführen, die eine Änderung der inneren Struktur und damit meist auch der physikalischen und chemischen Eigenschaften der behandelten Stoffe zum Ziele haben. Die bei einem energietechnischen Prozeß durchzuführende Verbrennung ist eine Stoffumwandlung – also ein Teil der Verfahrenstechnik – und eine verfahrenstechnische Änderung der inneren Struktur eines Stoffes ist in der Regel mit Wärmeumsatz verbunden, das heißt, sie reicht auch in den Bereich der Energietechnik.

Der Verfahrenstechniker wird gegen den Begriff „Energieverfahrenstechnik“ mit Recht einwenden, daß die Verfahrenstechnik weite Gebiete der Energietechnik schon immer be-

handelte und der Energietechniker hält entgegen, daß sein Fachgebiet schon lange vor Gründung der Verfahrenstechnik – und damit vor Schöpfung dieses Begriffes – die Stoffumwandlungsprozesse bei der Verbrennung und damit die dabei zu beachtende Reaktionsführung und die Nutzung der Reaktionsenthalpie beherrschte. Verfahrenstechniker und Energietechniker arbeiten deshalb in der Energiewandlung auch schon lange zusammen und man findet zahlreiche Verfahrenstechnik-Absolventen in energietechnischen Unternehmen. Wenn in jüngerer Zeit der Begriff „Energieverfahrenstechnik“ häufiger gebraucht wird, so hat dies wohl seinen Grund darin, daß zunehmende Forderungen nach einer die Umwelt so weit wie möglich schonenden und mit den natürlichen Ressourcen möglichst sparsam umgehenden Energiewandlung mehr und mehr verfahrenstechnisches Wissen und Denken in der Energietechnik verlangen.

Scheinbar widersprüchlich dazu haben sich Aktivitäten in der Forschung und Entwicklung für Arbeitsgebiete – wie z. B. Kohlevergasung und Kohleverflüssigung – auf Unternehmen der Energietechnik oder auch des Bergbaus verlagert, die vor 40 bis 50 Jahren, also während des 2. Weltkrieges, noch nahezu ausschließliche Domäne der chemischen Industrie waren. Hierfür mögen verschiedene Gründe maßgebend sein, z. B. die in jüngster Zeit stärkere – ja sogar besonders starke – Hinwendung der energietechnischen Industrie zur Verfahrenstechnik oder eine Marktverschiebung in beiden Industriebe-
reichen.

* Vortrag auf dem Jahrestreffen der Verfahrens-Ingenieure, 17. bis 19. Sept. 1986 in Straßburg.

** Prof. Dr.-Ing. F. Mayinger, Lehrstuhl A für Thermodynamik, TU München, Arcisstr. 21, 8000 München 2.

Hier soll versucht werden, die zunehmenden Kooperationsmöglichkeiten, ja vielleicht -notwendigkeiten, zwischen Verfahrenstechnik und Energietechnik anhand der neuen Entwicklung in der Energiewandlung auszuloten und damit das Arbeitsgebiet „Energieverfahrenstechnik“ zu umreißen. Einige mehr oder weniger willkürlich herausgegriffene technische Entwicklungen sollen Sinn, Vorteil und Zweckmäßigkeit dieser Kooperation illustrieren und demonstrieren. Schließlich wird der Versuch der Systematisierung dieses neuen Teilgebietes beider Disziplinen gemacht.

2 Kooperation zwischen Energietechnik und Verfahrenstechnik

Die Aufgaben der Energietechnik lassen sich unterteilen in:

- Bereitstellung von Energieträgern,
- Energieumwandlung,
- Energiespeicherung und -transport und
- Entsorgung.

In jedem dieser Teilgebiete fallen verschiedene verfahrenstechnische Prozesse an, deren optimale Auswahl und Führung durch die erwähnten Forderungen nach geringer Umweltbelastung und größtmöglicher Ressourcen-Schonung zunehmende Bedeutung gewinnen. Möglichkeiten der Bereitstellung von Energieträgern sind:

- Fossil, konventionell, z. B.: Kohlemahlung, -konditionierung, -transport;
- fossil, „veredelt“, z. B.: Kohlevergasung, -verflüssigung;
- nuklear, konventionell, z. B.: UO_2 Verarbeitung, Brennelementherstellung;
- nuklear, neue Verfahren, z. B.: Thorium, nukleare Prozeßwärme;
- additive Energieträger, z. B.: H_2 -Produktion, Biogas, Müll.

In weiterer Zukunft werden additiv zu den in fossiler oder nuklearer Form bereitgestellten Energieträgern auch andere Energieträger wie Wasserstoff, Biomasse und Müll eine zwar begrenzte aber doch nicht vernachlässigbare Rolle spielen. Fossile wie nukleare Energieträger können einer „konventionellen“ oder auch einer „neuen“ Energiewandlung zugeführt werden. Mit „fossil-konventionell“ ist dabei die Weiterbehandlung im Kraftwerk gemeint und unter „neuen Verfahren“ soll die Kohleveredelung – also die Kohlevergasung und verflüssigung – verstanden werden. Auch nukleare Energieträger – in Zukunft das aus Thorium erbrütete oder besser „konvertierte“ Uran 233 – können statt der Stromerzeugung als Prozeßwärme für Kohleveredelung oder andere Energiewandlungsprozesse dienen.

Verfahrenstechnisch zukünftig besonders interessante Aufgaben im Rahmen der Bereitstellung von Energieträgern dürften sich bei der Konditionierung von Kohle durch Zuschlagstoffe für eine stickoxidarme Verbrennung im Kraftwerk, bei der Kohleveredelung und bei der nuklearen Prozeßwärme stellen. Für die Bereitstellung additiver Energieträger sind in naher Zukunft bei der wärmetechnischen Müllverwertung, und in ferner Zukunft vielleicht bei der Gewinnung von Wasserstoff, verfahrenstechnische Aufgaben im industriellen Maßstab zu lösen.

Auch die Energiewandlung läßt sich in Verfahren mit fossilen, nuklearen und additiv-regenerativen Energieträgern unterteilen. Bei der konventionellen Energiewandlung im Kraftwerk sind aus verfahrenstechnischer Sicht vor allem Fragen der Verbrennungsführung, sei es bei Zyklon- und Rostfeuerung oder bei der zunehmend Interesse findenden Wirbelschichtfeuerung, zu lösen. Die Kohleveredelung bietet eine Fülle von

Aufgaben in der Reaktionsführung und Reaktionstechnik. Die Energiewandlung nuklearer Energieträger – Uran und Plutonium – scheint von verfahrenstechnischen Fragen wenig belastet zu sein. Doch selbst in der nuklear-konventionellen Kraftwerkstechnik bieten sich noch Tätigkeitsfelder. Erwähnt sei die Entwicklung von Neutronenabsorbern, die dem Kühlmittel oder dem Moderator beimischbar sind, und verglichen mit der bisher verwendeten Borsäure besondere Kurzzeiteinstellung der Leistung erlauben und weniger radioaktiven Abfall verursachen.

Die Einbindung der nuklearen Prozeßwärme in die Energietechnik – insbesondere auch der an der Grenze zwischen Maschinenbau und Verfahrenstechnik angesiedelte Wärmetransport – stellt noch viele ungelöste, höchst interessante Aufgaben.

Bleibt man bei den Überlegungen zu additiv-regenerativen Energieträgern in einer Zeitspanne für die nächsten ein bis zwei Jahrzehnte, so wird die Pyrolyse für die Müllbehandlung und die Energiegewinnung aus Müll einer intensiven Zuarbeit aus der Verfahrenstechnik bedürfen.

Einige Beispiele für noch zu lösende verfahrenstechnische Aufgaben bei der Speicherung und dem Transport von Energie sind:

- Fossile Energieträger: Kohleveredelung, Adsorption;
- nukleare Energieträger: Transport von Prozeßwärme;
- additive und regenerative Energieträger: Adsorption von Wasserstoff, Transport von flüssigem Wasserstoff, Wärmespeicherung.

Sie sind mit herkömmlichen Mitteln zu bewerkstelligen, wenn die Energie in Form von Reaktionswärme, also als chemische Energie in einem Energieträger – Kohle, Öl, Gas – oder als nukleare Energie in Uran oder Plutonium vorliegt. Dies gilt auch, wenn die Energieträger – wie z. B. SNG (Synthetic Natural Gas) oder Kohleöl – künstlich entstanden sind. Die Energieform „Wärme“ läßt sich in großen Mengen nur mit großem Aufwand und für lange Zeiten nicht oder nur äußerst unwirtschaftlich speichern. Dasselbe gilt für elektrische Energie, für welche die uns zur Verfügung stehenden Batteriearten äußerst bescheidene Aufnahmekapazitäten besitzen. Mechanische Energie läßt sich in größerem Umfang nur als potentielle Energie in Form von hochliegenden Wasserspeichern bewahren, wobei sie über Wasserturbinen verlustarm in elektrische Energie umgesetzt werden kann.

Auf lange Sicht wird der Verfahrenstechniker besonders für die Speicherung des aus Sonnenenergie gewonnenen Energieträgers „Wasserstoff“ gefordert sein. Man kann hier an Verflüssigung oder an Adsorption an feste Stoffe denken, wobei die Verflüssigung nicht zu verschweigende Risiken beinhaltet, und die Adsorption für ihre Wirtschaftlichkeit noch einer wesentlich stärkeren räumlichen Konzentration bedarf.

Die Entsorgung energietechnischer Prozesse stellt für den Verfahrenstechniker angesichts des zunehmenden Umweltbewußtseins in Zukunft die größte Herausforderung dar. Auf allen Gebieten der Energietechnik sind Verfahren der besseren Entsorgung von Reststoffen zu entwickeln, angefangen von der Kraftwerkstechnik mit fossilen und nuklearen Brennstoffen über die Kohleveredelung, sei es auf der Basis fossiler oder nuklearer Prozeßwärme, bis hin zu additiven Energieträgern wie z. B. Biomasse. Beispiele sind:

- Fossile Energieträger: Entschwefelung, Entstickung, Aschekonditionierung bei Kraftwerken; Verwertung von Koks und schwersiedenden Komponenten bei der Kohleveredelung;
- nukleare Energieträger: Krypton-Abscheidung, Tritium-Konditionierung bei der Wiederaufarbeitung; Konditio-

nierung hoch- und mittelaktiver Abfälle, Wiederaufarbeitung von HTR-Brennelementen, C-14-Verbleib; additive Energieträger: Verbleib und Verwendung der Reststoffe bei der Energieumwandlung aus Biomasse (Melasse, Treber).

Die Entschwefelung des Abgases kohlebeheizter Kraftwerke ist Stand der Technik und viele Großfeuerungsanlagen sind bereits mit Schwefeldioxid-Abscheidern ausgestattet. Das Schwefeldioxid wird größtenteils zu Gips, zum Teil auch zu Schwefelsäure aufgearbeitet. Für beide Produkte ist der vorhandene Markt nicht ausreichend aufnahmefähig. Der Kraftwerks-Gips muß deshalb deponiert werden, was im Rahmen der Entsorgung Fragen der langfristigen biologischen Wirkung dieses Reststoffes aufwirft. Rauchgas wird von Stickoxid großtechnisch überwiegend auf katalytischem Wege gereinigt, wobei durch Zugabe von Ammoniak das Stickoxid zu Stickstoff und Wasserdampf reduziert wird. Dabei gelangt aber etwas Ammoniak in die Flugasche des Rauchgases, was zu Aschekonditionierungsproblemen führen kann.

Sollte die Kohleveredelung in einigen Jahrzehnten großtechnisch eingeführt werden, so ist bereits jetzt über den Verbleib von Koks und schwersiedenden Komponenten nachzudenken, wenn der Markt hierfür nicht genügend aufnahmefähig ist.

Die Teeröle könnten, wenn nicht wirtschaftliche Gesichtspunkte dagegen sprechen, durch Aufhydrierung in leichter siedende Stoffe umgewandelt werden.

Die nukleare Entsorgung steht – wie man in der Presse nahezu täglich lesen kann – in einem heftigen Streit ideologischer Meinungsunterschiede. Es ist hier nicht der Ort, über Vor- und Nachteile der sog. „direkten Endlagerung“ und der Lagerung nach Wiederaufarbeitung des Brennstoffes zu diskutieren. Für Brennstoffe aus Leichtwasserreaktoren sind Wiederaufarbeitungsprozesse nicht nur bekannt und entwickelt, sondern außer in Frankreich, Großbritannien und den USA auch in der Bundesrepublik – Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) – seit Jahren bewährt in Betrieb. Sicher geben sich für den Verfahrenstechniker, wie bei jeder technischen Entwicklung, laufend Ansätze zur Verbesserung und Optimierung.

Das deutsche Atomgesetz, das abweichend von den Gesetzgebungen aller anderen Staaten, unabhängig von einem bereits unbedenklichen Absolutwert, eine Minimierung der radioaktiven Belastung der Umgebung von kerntechnischen Anlagen verlangt, erzwingt über diesen Stand der Technik hinausgehende Entwicklungsarbeiten. Dadurch wird es notwendig werden, Krypton aus der Abluft der Wiederaufarbeitungsanlage Wackersdorf soweit wie technisch möglich abzuscheiden, wofür verschiedene Entwicklungsarbeiten im Gange sind, und auch die sog. Konditionierung von Tritium – z. B. durch Einbinden in wäßriger Form in Beton oder durch Verpressen in tiefe Schichten – wird untersucht und entwickelt.

Ein großes Betätigungsfeld für den Verfahrenstechniker bietet die Konditionierung nuklearer Abfälle der Prozeßwärmeerzeugung. In der Bundesrepublik Deutschland ist für die Prozeßwärmeerzeugung – nach dem derzeitigen Stand der Technik – der Hochtemperaturreaktor mit gasgekühlten, graphit-modierten, kugelförmigen Brennelementen vorgesehen. Dabei sind Graphitpartikel mit Brennstoffpartikel homogen vermischt. Bis heute existiert kein Wiederaufbereitungsverfahren für diese Brennelemente. Eine Trennung der Graphitpartikeln von den Brennstoffpartikeln durch Oxidation, die man bei niedriger Temperatur durchführen müßte, würde große Mengen radioaktiven Kohlenstoffs (^{14}C) in Form von Kohlendioxid in die Umgebung freisetzen. Diese Brennelemente müssen bis jetzt ohne Wiederaufarbeitung in solche Lagerstätten eingebracht bzw. endgelagert werden, bei denen

eine Verschleppung radioaktiver Stoffe durch Auslaugung ausgeschlossen werden kann.

Biomasse – z. B. Zuckerrüben oder Raps – würde dann zu Entsorgungsschwierigkeiten führen, wenn große Mengen Reststoffe in Form von Melasse oder von Treber räumlich eng konzentriert anfielen. Die bei kleinen Mengen Zuckerrohr bewährte Methode, Melasse zu Rum oder Arrak zu vergären, würde nicht nur aus Mangel an Abnehmern scheitern.

3 Ausgewählte Beispiele neuer Kooperationsgebiete

Es würde bei weitem den Rahmen dieser Übersicht sprengen, wollte man hier die Möglichkeiten und Notwendigkeiten der Kooperation von Verfahrenstechnik und Energietechnik auch nur einigermaßen umfassend oder gar erschöpfend behandeln. Deshalb seien einige Beispiele neuer, in Entwicklung befindlicher Kooperationsgebiete herausgegriffen und sporadisch auf die Kraftwerkstechnik, die Kohleveredelung, die Wasserstofftechnik und die Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen verteilt.

3.1 Entstickung von Rauchgasen

Weltweit wurden verschiedene Verfahren zur Abscheidung bzw. Reduktion von Stickoxiden aus Rauchgasen von mit Kohle befeuerten Kraftwerken entwickelt. Sie lassen sich pauschal in Naß- und Trockenverfahren unterteilen. Naßverfahren, d. h. Rauchgaswäscher, arbeiten mit Oxidation, Absorption und auch Reduktion der Stickoxide. Trockenverfahren können ganz unterschiedliche Verfahrensprinzipien zugrunde liegen. Es gibt absorptive Verfahren sowie Verfahren der katalytischen und der nicht-katalytischen Reduktion. Eine Sonderstellung nimmt das Elektronenstrahlverfahren ein, das bis jetzt nur im Labormaßstab erprobt wurde und bei dem die Anregung der Elektronenhülle die Reduktion von NO_x und die Überführung von SO_2 in abscheidbare Stoffe erlaubt. Dieses Verfahren eignet sich vermutlich nur für kleinere und mittelgroße Feuerungen.

Aufgrund weltweiter Entwicklung scheint das selektive katalytische Verfahren – SCR-Verfahren genannt (von „selective catalytic reduction“) – die besten Aussichten auf einen großtechnischen Einsatz zu haben. Kernstück des Verfahrens ist ein Katalysator, der wabenförmig oder in Form eines Festbettes angeordnet sein kann. Als Reduktionsmittel kämen neben Ammoniak auch Wasserstoff, Kohlenmonoxid, Methan oder auch andere Kohlenwasserstoffe in Frage; es wird jedoch in erster Linie Ammoniak verwendet.

Grundsätzlich sind für die Installation eines SCR-Reaktors zwei verschiedene Möglichkeiten gegeben, nämlich die Anordnung vor dem Luft-Vorwärmer und dem Elektrofilter – wobei man von einer sog. „heißen“ SCR-Anlage spricht – und die Schaltung hinter dem Elektrofilter. Die Anordnung vor dem Elektrofilter kommt dem im Katalysator geforderten Temperaturniveau von 300–400 °C entgegen. Nachteilig bei dieser Anordnung ist, daß das Rauchgas hier noch Staub und Schwefeldioxid enthält. Der Staub kann die aktiven Flächen des Katalysators belegen, was seine Regeneration sehr schwierig macht, insbesondere weil die im Staub enthaltenen Schwermetalle Katalysatorgifte sind. Das im Abgas enthaltene SO_2 kann zusammen mit dem als Reduktionsmittel beigegebenen Ammoniak sich zu Ammoniumhydrogensulfat verbinden, das als zähflüssige, klebrige Masse korrosiv wirkt. Trotzdem haben Erfahrungen in Japan gezeigt, daß diese

„heiße“ SCR-Anlage eine technisch und kommerziell günstige Lösung darstellt.

Bei der Anordnung des SCR-Reaktors hinter dem Elektrofilter wird auch noch die Rauchgas-Entschwefelungsanlage zwischengeschaltet. Die Rauchgase sind nach dieser REA-Anlage auf 50–60 °C abgekühlt und müssen deshalb wieder auf die Arbeitstemperatur des Katalysators – entweder in einem regenerativen Gasvorwärmer oder durch Wärmezufuhr aus einer Verbrennung – aufgewärmt werden. Nachteile dieser Anordnung sind, daß der Massenstrom des Rauchgases wegen Leckagen im Luftvorwärmer hinter der REA-Anlage größer ist als vor dem Luftvorwärmer und die Leckage des Gaswärmetauschers eine erneute Belastung des entstickten Rauchgases bewirkt. Dies führt dazu, daß der Katalysator bei dieser Anordnung um ca. 50% größer sein muß als bei der vorher erwähnten „heißen“ Konfiguration.

Der Katalysator ist wabenförmig oder auch als Füllkörper-Festbett angeordnet. Waben- oder plattenförmige Anordnung hat den Vorteil niedrigen Druckverlustes für das Rauchgas, erfordert aber bei gleicher aktiver Oberfläche ein insgesamt größeres Bauvolumen als die Füllkörper-Konfiguration.

Die Keramikkörper bestehen aus hochporösem Material, z. B. Titandioxid, das von der aktiven Substanz, meist Vanadiumpentoxid, durchsetzt ist. Diese homogene Durchsetzung des porösen Grundmaterials mit dem eigentlichen Katalysator hat den Vorteil, daß bei Erosionen die Aktivität nicht verloren geht. Bei Katalysatorelementen aus Füllkörpern könnte sogar ein Staubbelag bei der regenerativen Behandlung mechanisch abgerieben werden.

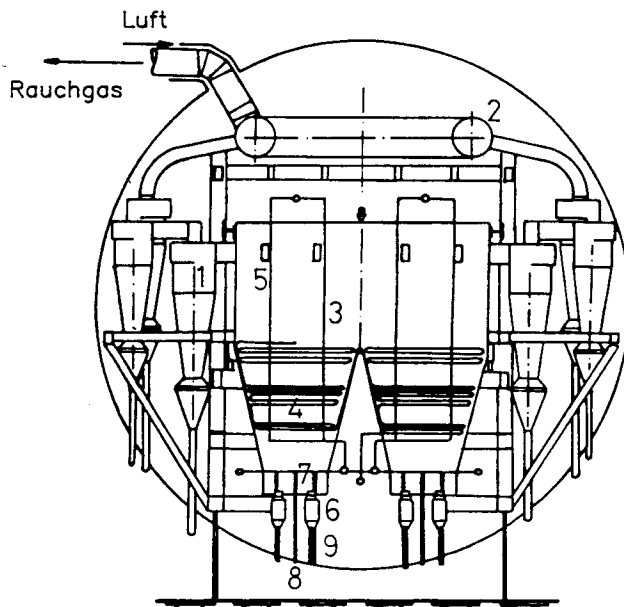
Lohnende Aufgaben des Verfahrenstechnikers liegen bei der Katalysatorentwicklung in der Auswahl und Anordnung des Trägers sowie des aktiven Materials. Die deutsche chemische Industrie, wie z. B. BASF, Bayer, Kali-Chemie, haben sich bereits dieser Aufgaben angenommen. Weiterhin laufen Entwicklungen bei KWU und Siemens. Betrieb und Auslegung dieser Anlagen müssen dem verwendeten Brennstoff und der Feuerraum-Konzeption angepaßt werden. Auch hier stellt sich eine Reihe verfahrenstechnischer Aufgaben für die Energietechnik. Es gilt, die NH_3 -Emissionen zu verringern, die zum Teil mit der Flugasche entweichen und die Korrosionsprobleme durch Ammoniumhydrogensulfat-Ablagerungen in den Wärmeaustauschern zu beherrschen. Für die Wirtschaftlichkeit der Verfahren ist der Katalysator-Verbrauch bzw. die Katalysator-Lebensdauer von großer Bedeutung, wobei hier auch die SO_2 -/ SO_3 -Empfindlichkeit der eingesetzten Katalysatoren eine Rolle spielt. Der SCR-Katalysator wirkt nicht immer vollständig selektiv, so daß auch mit einer Konvertierung des SO_2 gerechnet werden muß.

3.2 Wirbelschichtfeuerung

Verfahrenstechnisch besser als die Abscheidung von Schad- bzw. Reststoffen aus dem Abgas einer Feuerung ist die möglichst weitgehende Verhinderung der Entstehung solcher Stoffe durch eine geeignete Reaktionsführung. Hier kann die Wirbelschichtfeuerung einen Beitrag liefern.

Das Wirbelschichtverfahren wurde ursprünglich in der chemischen Industrie, nämlich von Winkler, BASF, entwickelt, damals zur partiellen Oxidation von Kohle und zur Erzeugung von Wassergas – Kohlenmonoxid und Wasserstoff. Mit billiger werdendem und reichlich verfügbarem Rohöl wurde die Wassergaserzeugung aus Kohle im Wirbelschichtverfahren dann zugunsten von flüssigen Kohlenwasserstoffen – meist Naphta als Ausgangsstoff – aufgegeben. In Ländern mit sehr aschereicher Kohle, wie z. B. China, wurde die Wirbelschichtverbrennung, allerdings mit sehr einfachen techni-

schen Mitteln, über Jahrzehnte hinweg bis heute eingesetzt. In der Bundesrepublik Deutschland gewann die Wirbelschichtverbrennung vor einigen Jahren wieder an Interesse als Verfahren zur schadstoffarmen Verbrennung. Eine von Babcock [1] schon vor einigen Jahren vorgestellte Zukunftsvision ist dabei die aufgeladene Wirbelschichtfeuerung. Abb. 1 zeigt einen von Babcock vorgestellten Entwurf, wie eine konstruktive Lösung eines solchen aufgeladenen Wirbelschichtsystems aussehen kann. Alle unter Überdruck stehenden Apparate sind in einem Behälter – ähnlich dem Containment eines Druckwasserreaktors – eingeschlossen, der für den Betriebsdruck des Wirbelschichtsystems auszulegen ist.



8 5361.1

Abb. 1. Combuster für aufgeladene Wirbelschichtfeuerung (Babcock); 1 Zyklon, 2 Rauchgassammelleitung, 3 Überhitzer, 4 Verdampfer, 5 Vorwärmstufe, 6 Anfahrbröner, 7 Luftkasten, 8 Bettascheabzug, 9 Kohlezufuhr.

Die Umfassungswände der Apparate – wie Dampferzeuger, Zyclone zur Ascheabscheidung und Verbindungsleitungen – brauchen dann nur noch für den Differenzdruck des Wirbelschichtsystems bemessen zu werden. Das aus dem Containment austretende heiße Rauchgas wird in einem isolierten Rohr einer Gasturbine zugeführt. Kohlezufuhr-, Ascheabzugsrohre sowie die Zu- und Abführrohre für Dampf und Wasser müssen wärmeelastisch durch das Containment geführt werden.

Neben der Reaktionsführung und der Fluidodynamik in diesem Wirbelbett stellt die Heißgasentstaubung ein besonderes verfahrenstechnisches Problem dar. Man könnte sich dann vorstellen, daß solche aufgeladenen Wirbelschichtsysteme in Modulbauart betrieben werden, wobei die Modulleistung von der Größe der verfügbaren Gasturbine abhängt. Nimmt man an, daß die Überschubleistung einer solchen Gasturbine bei maximal 120 MW liegt, so könnte sich bei einer Leistungsaufteilung zwischen Dampf- und Gasturbine von 2/3 bis 1/3 eine Modulleistung von ca. 350 MW ergeben.

Verfahrens- und umwelttechnisch bedeutet der Betrieb der Wirbelschicht unter Überdruck nicht nur eine Reduzierung der NO_x -Menge im Abgas, sondern es kann dann sogar die sonst bei der Wirbelschicht zur Reduzierung des Schwefeldioxids notwendige Kalkstein-Zugabe weitgehend entfallen bzw. deutlich reduziert werden. Bei Druckfeuerungen um 10 bar kann der Kalkstein-Einsatz auf ca. 1/3 bis 1/4 reduziert

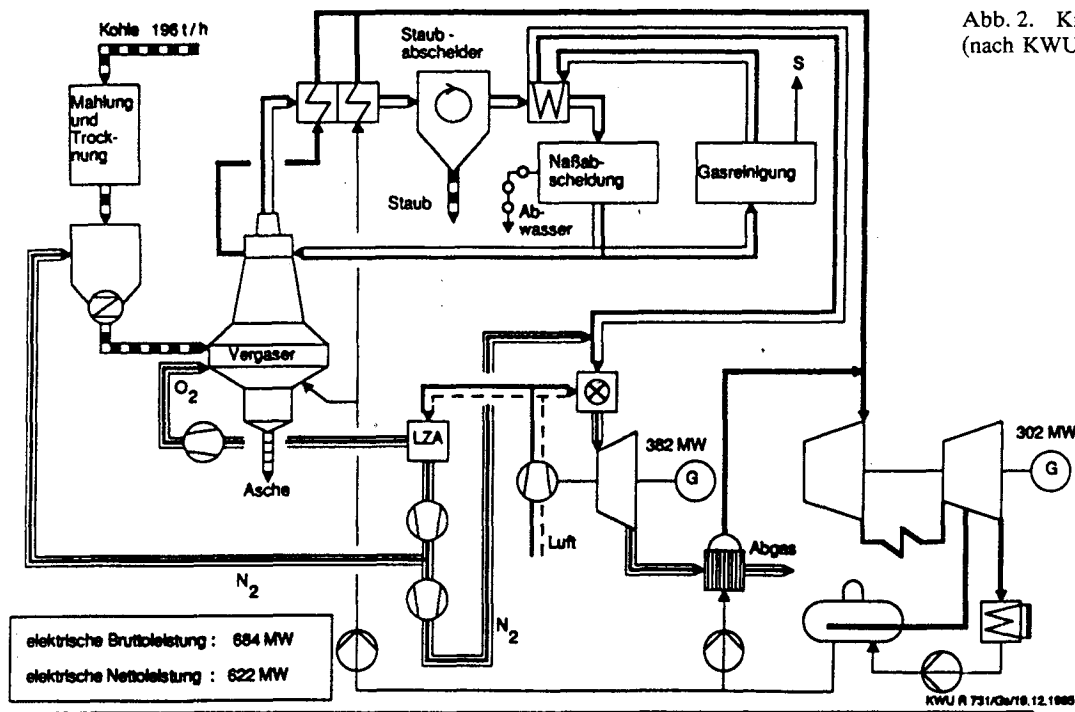


Abb. 2. Kraftwerk mit Flugstromvergasung (nach KWU).

werden, um den gleichen Entschwefelungsgrad wie bei atmosphärischen Feuerungen zu erhalten. Einen gleichen günstigen Einfluß hat die Drucksteigerung auch auf die Verminderung der NO_2 -Konzentration.

Das CaSO_4 kann als Aschebestandteil ohne Gefährdung deponiert werden, da es neutral ist. Da jedoch wegen der Überschußfahrweise immer überschüssiges CaO im CaSO_4 vorhanden ist, welches wasserlöslich ist und eine Base bildet, sind für die Lagerung besondere Maßnahmen erforderlich. Weiterverarbeitungsmöglichkeiten, z. B. zu Baustoff, bereiten noch Schwierigkeiten; ihre Lösung wäre ebenfalls eine dankbare verfahrenstechnische Aufgabe.

3.3 Kohleveredelung

Die Technik der Kohleveredelung – Verflüssigung und Vergasung – war bereits vor 40 Jahren in Deutschland sehr weit fortgeschritten. Sie verdankte damals ihre Entwicklung den kriegsbedingten Versorgungsengpässen an Erdölderivaten als flüssige Treibstoffe. Entwicklung und Betrieb der Kohleveredelungsanlagen lagen ausschließlich bei der chemischen Industrie.

Mitte der Siebzigerjahre wurde – angestoßen durch ein finanziell umfangreiches Förderprogramm des Bundesministers für Forschung und Technologie – die Technik der Kohleveredelung wieder aufgegriffen, ja teilweise wurden in den Vierzigerjahren bekannte aber zwischenzeitlich wieder etwas in Vergessenheit geratene Verfahren zwar nicht neu erfunden, aber doch in manchem Detail neu entwickelt. Interessant war dabei zu beachten, daß sich die chemische Industrie trotz – oder vielleicht auch wegen – ihres Know-hows aus der Mitte der Siebzigerjahre neu beginnenden Entwicklung völlig fernhielt. Aktiv wurden die Bergbauunternehmen [2], wohl nicht zuletzt unter dem Eindruck, sie müßten den Markt für die Kohle – angesichts des damals wesentlich mächtiger als heute scheinenden Konkurrenzdrucks der Stromerzeugung aus Kernenergie – sichern. So entstanden Pilotanlagen zur Kohleverflüssigung bei Unternehmen der Bergbauindustrie. Der Vollständigkeit halber ist zu erwähnen, daß sich die chemi-

sche Industrie – z. B. Lurgi – bei der Kohlevergasung stärker engagiert, obwohl hier die Verhältnisse einfacher und die großtechnische Verwirklichung weiter fortgeschritten sind.

Wie sehr der Verfahrenstechniker bei zukünftigen Kraftwerksprojekten, die auf der Basis von Kohlevergasung – also mit Kohleveredelung – arbeiten, gefordert ist, mag man aus Abb. 2 erkennen, die ein Kraftwerkskonzept der KWU mit Flugstromvergasung zeigt. Abgesehen vom Vergaser selbst, dem Kernstück der Anlage, erfordert die Auslegung der Gasreinigungsapparate und teilweise auch der Kohleaufbereitung verfahrenstechnisches Know-how. Enge Kooperation zwischen Verfahrenstechniker und Energie-Ingenieur ist nicht nur bei der Planung und Auslegung der Anlage, sondern auch bei deren Betrieb gefordert. Wesentlich komplizierter werden die ingenieurwissenschaftlichen Interaktionen, wenn man Kernenergie als Energieträger für die Kohleverflüssigung heranziehen will. Es spielen dann Kerntechnik, Verfahrenstechnik und Energietechnik zusammen. Die Kerntechnik ist bei der Entwicklung neuer Ideen für Apparate zur Erzeugung und Einbindung nuklearer Prozeßwärme in chemische Reaktionen – insbesondere zur Kohleverflüssigung und -vergasung – erfreulich progressiv, aber auch erstaunlich optimistisch. Wenn der Grad des Optimismus proportional zur zeitlichen Entfernung der Verwirklichung ist, so soll dies nicht weiter verwundern; man darf dann aber auch nicht vergessen, welche technischen Schwierigkeiten – ganz abgesehen von den politischen – noch vor uns liegen.

Abb. 3 zeigt die Skizze einer Projektstudie für einen Hochtemperaturreaktor mit Röhrenspaltöfen und Dampferzeuger in Modul-Bauweise. Der Kern des Hochtemperaturreaktors ist als Kugelschüttung ausgeführt und in einem Druckbehälter untergebracht. Mit diesem Druckbehälter über eine einzige kurze, allerdings in mehrschaliger Bauweise ausgeführte Leitung verbunden ist ein zweiter Druckbehälter, welcher den Dampferzeuger und den Röhrenspaltöfen enthält. Den Wärmetransport von der Kugelschüttung der Brennelemente zum Röhrenspaltöfen und zum Dampferzeuger übernimmt Helium mit einer Temperatur von 950°C , vielleicht sogar 1150°C . Röhrenspaltöfen und Dampferzeuger sind konzentrisch angeordnet, wobei das heiße Helium zuerst in den im

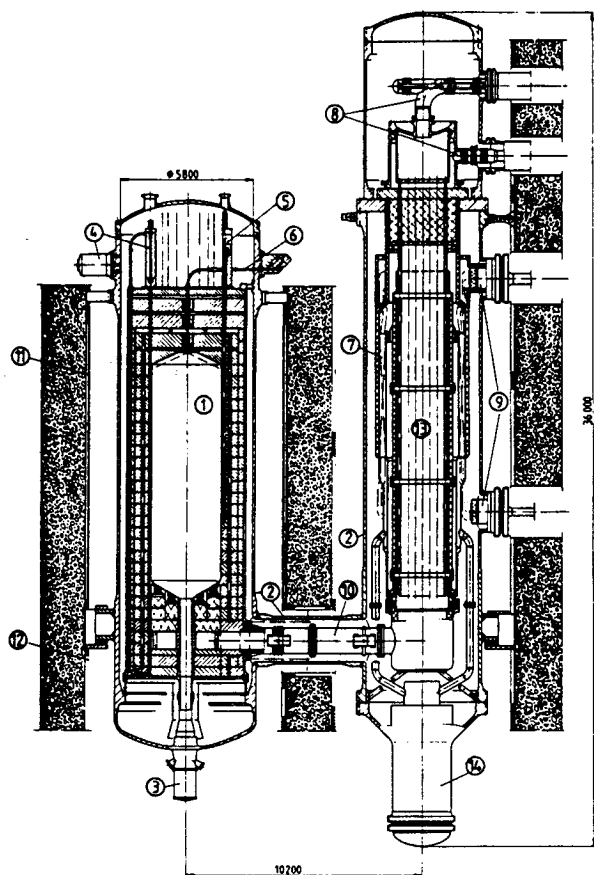


Abb. 3. Modul eines Hochtemperaturreaktors mit Röhrenspaltfen und Dampferzeuger; 1 Kugelschüttung, 2 Druckbehälter, 3 Brennelement-Abzug, 4 Kleinkugel-Abschaltelement, 5 Reflektorstab, 6 Brennelement-Beschickung, 7 Dampferzeuger, 8 Spaltgasanschlüsse, 9 Dampferzeugeranschlüsse, 10 Heißgasleitung, 11 Flächenkühler, 12 Isolierung, 13 Röhrenspaltfen, 14 Gebläse.

Kern befindlichen Röhrenspaltfen und dann zur Restwärmeausnutzung an den im Ringraum angeordneten Dampferzeuger strömt. Die Heliumumwälzung übernimmt ein Gebläse, das im zweiten Druckbehälter unter dem Röhrenspaltfen angeordnet ist und das aus dem Dampferzeuger abströmende, abgekühlte Gas zurück in den Reaktor drückt [3].

Hier bietet sich dem Verfahrenstechniker zusammen mit dem Kern- und Energietechniker noch eine Fülle interessanter Entwicklungsaufgaben. Sie reichen von der Auslegung, Konstruktion und Gestaltung der Wärmeaustauscherflächen und der Heliumtransportwege über die Reaktionsführung im Röhrenspaltfen bei der durch den Reaktor vorgegebenen oberen Temperaturbegrenzung bis zu Fragen der Sicherheit und Zuverlässigkeit solcher Anlagen. Chemisches Know-how zusammen mit kerntechnischen Betriebserfahrungen, die auf dem Gebiet des Hochtemperaturreaktors noch zu sammeln sind, sind hier in höchstem Maße gefragt und gefordert.

3.4 Wiederaufarbeitung

Bei der Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen gibt es eine Reihe interessanter verfahrenstechnischer Aufgaben zur Optimierung der bereits erprobten und auch bewährten Prozessschritte. Zu erwähnen wären z. B. Verbesserungen der Fernbedienungstechnik in den hochradioaktiven Bereichen, weitere Untersuchungen zur Verglasungstechnik oder die Optimierung des Stickstoffverbrauchs für die Inertisierung der Anlage.

Wie bereits einleitend erwähnt, kommt aber vom Standpunkt des Umweltschutzes der Weiterentwicklung und Optimierung von Verfahren zur Krypton-85-Rückhaltung eine ganz besondere Bedeutung zu. Derzeit befinden sich drei Verfahren in der Entwicklung, nämlich:

- die kryogene Rektifikation,
- die Absorption in Lösungsmitteln und
- die Adsorption an Festkörpern.

Jedes dieser Verfahren hat spezifische Vor- und Nachteile. Die wesentlichen technischen und sicherheitstechnischen Nachteile der Kryorektifikation sind das große, radioaktive Krypton-Inventar, der Druckbetrieb und die komplexe Abgas-Vorreinigung durch Verbrennen des Abgas-Sauerstoffes mit Wasserstoff. Auf der anderen Seite sind der bereits erbrachte Entwicklungsaufwand sowie die hohe Reinheit des auf diese Art und Weise abgetrennten und gewinnbaren Kryptons sehr vorteilhafte Verfahrenscharakteristika.

Die Druckvariante der Edelgaswäsche mit R12 wird in der Oakridge Gaseous Defusion Plant, USA, seit mehr als einem Jahrzehnt bis in den halbertechnischen Maßstab untersucht. Die dort durchgeführten Entwicklungsarbeiten bilden die Grundlage für das Referenzverfahren zur Edelgasrückhaltung bei der kommerziellen Aufarbeitung in den USA. Ein druckloses Waschverfahren mit CCl_4 wurde vor mehr als zwei Jahrzehnten in Großbritannien untersucht. Dieses Waschverfahren hat den Vorteil, daß das radioaktive Krypton-Inventar des Wäschers gering ist, weshalb auch die Strahlenszerstörung des Lösungsmittels nicht ins Gewicht fällt. Die Verfahrenstechnik entspricht der bekannten Gasabsorption und -desorption. Die erreichbaren Abgas-Dekontaminationsfaktoren und Produktreinheiten sind voraussichtlich nicht so hoch wie bei der kryogenen Rektifikation.

Bei der Krypton-Abtrennung durch Adsorption an Festkörpern werden Aktivkohle oder Molekularsiebe verwendet. Auch dieser Prozeß ist verfahrenstechnisch bekannt; sein Nachteil ist jedoch, daß kein kontinuierlicher Betrieb möglich ist, da der Festkörper nach Beladung einem Desorptionsprozeß unterzogen werden muß. Hierzu ist zumindest eine Umlenkung der Prozeßströme, wenn nicht eine Herausnahme des Festkörpers aus dem Sorptionsbereich notwendig. Vorteilhaft ist, daß das radioaktive Krypton-Inventar niedrig gehalten werden kann, dagegen ist die erzielbare Reinheit des Kryptons nicht so hoch wie die bei der kryogenen Rektifikation. Die Krypton-Abscheidung durch Adsorption wird in Japan verfolgt.

3.5 Wasserstoff-Technik

Wasserstoff als chemischer Rohstoff ist seit langem am Markt. Sollte die Kohleveredelung in absehbarer Zukunft technische Anwendung finden, so könnte der Bedarf an Wasserstoff noch steigen. Sehr optimistische Zukunftsprognosen sprechen davon, daß Wasserstoff einmal der universell einsetzbare Energieträger einer nicht fossilen Energiewirtschaft werden könnte.

Aus Kostengründen wird Wasserstoff vermutlich noch auf längere Zeit aus fossilen Rohstoffen hergestellt werden. Soll er aus Wasser gewonnen werden, z. B. über Elektrolyse, so müßte in Zukunft entweder Strom zu außergewöhnlich niedrigen Gesteungskosten verfügbar sein, was vermutlich nicht Realität wird, oder es steigt der Energiepreis aus fossilen Ressourcen so sehr, daß die Solarenergie konkurrenzfähig würde. Verknappung auf dem Weltenergiemarkt, insbesondere aber die Einführung weiterer Umweltschutztechniken – von einer Ablehnung der Kerntechnik ganz abgesehen – können zu einer mehr oder weniger starken Erhöhung des Energiekosten-

niveaus führen. Dies könnte Solarenergie in ariden und wenig dicht besiedelten Zonen in ferner Zukunft durchaus näher an den wettbewerbsfähigen Bereich heranbringen. Forschungsarbeiten zur Herstellung und Nutzung von Wasserstoff sind im Gange und werden sicher auch zukünftig weitergeführt. Bei der Diskussion um die zukünftige Nutzung von Wasserstoff aus Solarenergie steht meist der Preis und der Flächenbedarf für die Solaranlagen im Vordergrund. Einen weiteren, besonders für die Grundstoffindustrie und die Verfahrenstechnik interessanten Aspekt warf vor kurzem Nitsch [4] auf, nämlich den des laufenden Materialverbrauchs für die Aufrechterhaltung einer permanenten Wasserstoffproduktion auf Solarenergiebasis. Nitsch ging dabei davon aus, daß nach der Jahrtausendwende in der Bundesrepublik Deutschland 40 % des heutigen Endenergiebedarfs aus Wasserstoff gedeckt wird, was etwa $100 \cdot 10^6$ t SKE/a entspricht. Er zieht in seine Betrachtungen auch den Weltenergiebedarf ein, wobei er wegen der in vielen Ländern für die Wasserstoffproduktion günstigeren klimatischen Bedingungen davon ausgeht, daß weltweit 67 % des heutigen Endenergiebedarfs durch Wasserstoff gedeckt werden könnten. Abb. 4 zeigt für einige Grundstoffe sowie für Kunststoff den jährlichen Materialbedarf in Prozent des derzeitigen Produktionsvolumens in der Bundesrepublik bzw. in der Welt. Man erkennt, daß sich in der Bundesrepublik für Eisen, Aluminium und Kunststoff die notwendigen Zuwachsraten noch einigermaßen in Grenzen halten, wenn auch bei Eisen bereits ein Produktionszuwachs von 20 % notwendig würde, was für die entsprechenden Wirtschaftszweige durchaus erwünscht sein könnte, da der Verbrauch an anderer Stelle vermutlich zurückgeht. Bei Nickel und Glas müßte sich aber die Produktion in der Bundesrepublik sogar verdoppeln und der Silicium-Markt müßte, wenn die Sonnenenergienutzung auf Solarzellen basieren sollte, um den Faktor 100 steigen. Weltweit sieht die Situation wesentlich schwieriger aus, was auf die derzeit im Mittel geringeren Produktionsmengen an verschiedenen Rohstoffen und vermutlich auch auf den größeren Nachholbedarf in der Energiebereitstellung zurückzuführen ist.

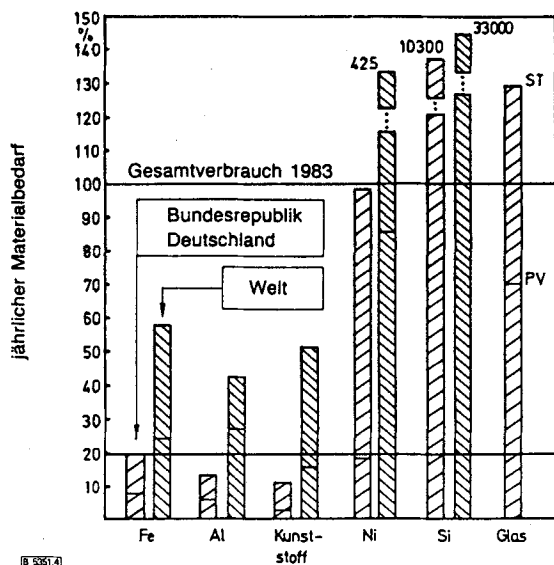


Abb. 4. Materialbedarf für Nutzung der Sonnenenergie nach Nitsch [4]. Jährlicher Materialbedarf in Prozent des Produktionsvolumens des betreffenden Versorgungsgebietes für die Aufrechterhaltung einer permanenten Wasserstoffproduktion auf Solarenergiebasis von $100 \cdot 10^6$ t SKE/a (BRD) bzw. $5000 \cdot 10^6$ t SKE/a (Welt). Mittlere Lebensdauer der Anlagen 30 Jahre. PV Solarzellen mit Elektrolyse, ST Solarturm mit thermischem Speicher und Elektrolyse.

Aus alledem folgt, daß das Wissen, das Mitdenken und die Mitarbeit des Verfahrenstechnikers, der nicht nur sein spezielles technisch-wissenschaftliches Know-how einbringt, sondern der auch Erfahrung darüber hat, wie sich Umschichtungen am Rohstoffmarkt auswirken, für die zukünftige Entwicklung der Solar- und Wasserstoff-Technik dringend notwendig sind. Weder konservativer Pessimismus noch fortschrittsgläubige Euphorie sind hier gefragt sondern nüchternes, naturwissenschaftliches und technisches Denken, das stets die Marktmöglichkeiten – natürlich auch die politischen Realitäten – im Auge behält. Dabei ist auch zu berücksichtigen, daß bei der weltweiten jährlichen Steigerung des Energiebedarfes und dessen Deckung aus überwiegend fossiler Energie der CO_2 -Ausstoß aus den Verbrennungsanlagen allmählich einen Umfang annehmen würde, der nicht mehr tolerierbar sein könnte, da er einschneidenden Einfluß auf die Klimaentwicklung hätte. Nitsch [4] veranschlagt langfristig den Anstieg des Weltenergiebedarfes auf $20 \cdot 10^9$ t SKE/a und entwickelt daraus ein Szenario, daß bis zum Jahre 2000 insgesamt 23 % dieses Bedarfes aus Solarenergie – insbesondere Wärme aber auch Elektrizität – gedeckt werden könnte. Selbst dann würde die CO_2 -Produktion weltweit 50 % über dem heutigen Wert liegen. In diesem Zusammenhang ist vielleicht erwähnenswert, daß die mittlere CO_2 -Konzentration von 1850 bis 1950, also im Laufe von 100 Jahren, um 25 ppm stieg, und von 1950 bis 1985, also in einem Zeitraum von nur 35 Jahren, war nochmals der gleiche Anstieg zu verzeichnen.

3.6 Energieverfahrenstechnik in der Stoffumwandlung

Keht man nach diesen zukunftsorientierten Exkursionen wieder in die Gegenwart zurück, so findet man ein weiteres großes Gebiet, um das sich eine Energieverfahrenstechnik annehmen könnte und müßte, nämlich das der Stoffumwandlung.

Tabelle 1. Verfahrenstechnischer Forschungs- und Entwicklungsbedarf bei verschiedenen Methoden der Energieumwandlung.

Arten der Energieumwandlung Arbeiten und Problemgebiete	Kraftwerktechnik	Veredelung v. Energieträgern durch Stoffumwandlung	Energieumwandlung bei Herstellung technischer Produkte	Regenerative Energie	Fusion
Grundlagen	gFE ¹⁾	WbV(NI)	NI	NI(oP)	NI
Speicherung v. Energie und Masse	–	WbV	–	oP	NI
Transport v. Energie und Masse	gFE	WbV	–	oP	NI
Meßtechnik	WbV	NI	NI	NI	NI oP
Sicherheitstechnik	WbV	WbV NI	WbV NI	NI oP	oP
Optimierung	WbV	NI	oP	oP	oP

1) gFE geringer Forschungs- und Entwicklungsbedarf; WbV Weiterentwicklung bekannter und bestehender Verfahren; NI Neue Ideen erforderlich; oP offenes Problem.

lung. Hierbei ist nicht so sehr an die in der Chemie angesiedelten Verfahren gedacht, da hier seit vielen Jahren neben einer optimalen Verfahrensführung auf eine bestmögliche Energienutzung geachtet wird, sondern an Stoffumwandlungsprozesse, die im Maschinenbau angesiedelt sind, wie z. B. die Verhüttung und Weiterverarbeitung von Metallen bis hin zu Verformungsprozessen, die mit erhöhter Temperatur arbeiten.

Diese Prozesse laufen bisher – und das aus der Sicht des Maschinenbauers zurecht – unter dem Primat der Produktqualität ab. Dabei wird in jüngerer Zeit durchaus verschiedentlich versucht, z. B. bei der Stahlveredelung, die Ab- und Prozeßwärme zu nutzen. In vielen Fällen ließe sich aber von vornherein durch eine andere Prozeßführung Primärenergie einsparen, ohne daß die Produktqualität Schaden leidet. Dies gilt in vielen Bereichen der Nahrungs- und Genußmittelindustrie, wobei aber auch hier von einzelnen Unternehmen schon viel getan wird. Eine bessere Kooperation zwischen Verfahrenstechnikern oder Lebensmitteltechnikern und Energietechnikern könnte hier weitere Fortschritte bringen. Z. B. lassen sich durch den Übergang vom absatzweisen zum kontinuierlichen Betrieb Energieströme zwischen den einzelnen Verfahrensschritten besser austauschen und damit besser verwerten. Verschiedentlich können durch eine Änderung der Verfahrensweise bisher notwendig erscheinende Zwischenkühlungen und wieder Aufheizungen im Laufe des Fertigungsprozesses vermieden werden. Großen Energiebedarf hat bekanntlich die thermische Trocknung und eine um wenige Procente höhere Feuchte, während oder am Ende des Verarbeitungsprozesses, kann hier schon eine erhebliche energietechnische Verbesserung bringen.

4 Versuch einer Systematisierung neuer Kooperationsgebiete

Im Vorstand der Gesellschaft für Verfahrenstechnik (GVT) im VDI wurde angeregt, ein Koordinationsgremium – zusammengesetzt aus Vertretern der Energietechnik und der Verfahrenstechnik – einzuberufen, das Arbeitsgebiete und Kooperationsmöglichkeiten in der Energieverfahrenstechnik aufzeigt und initiiert. In einer ersten Besprechung dieses Koordinationsgremiums wurden für die vier Bereiche der Energiewandlung:

- Kraftwerkstechnik,
- Veredelung von Energie durch Stoffumwandlung,
- Herstellung technischer Produkte bei Energiewandlung und
- Regenerative Energien

verschiedene Themenstellungen verfahrenstechnischer Art, aber auch solche, die sich aus Gesichtspunkten zur Schonung der Umwelt ergeben, diskutiert. Man kann diese Themen unterteilen in einen Komplex, der sich dem zukünftigen verfahrenstechnischen Forschungs- und Entwicklungsbedarf widmet, und einen anderen, der die Verfahrenstechniken zur Reststoffbehandlung zum Gegenstand hat. Diesen Versuch einer Einteilung zeigen die Tab. 1 und 2, jeweils in Form einer Matrix, wobei gleichzeitig noch abgeschätzt wurde, welcher Grad an Forschungs- und Entwicklungsbedarf noch besteht oder ob es sich um ein offenes Problem handelt, über dessen Lösung noch keine Aussage gemacht werden kann. Der Vollständigkeit halber ist auch die Kernfusion als – hoffentlich in nicht allzu ferner Zukunft – technisch nutzbares Verfahren zur Energiewandlung aufgeführt.

Die Matrix in Tab. 1 stellt die technischen Probleme, die in Tab. 2 die umweltrelevanten Fragen für die verschiedenen Energiewandlungsverfahren dar. Wie zu erwarten, bietet die

Tabelle 2. Verfahrenstechniken zur Reststoffbehandlung bei verschiedenen Methoden der Energiewandlung.

Arten der Energiewandlung	Kraftwerkstechnik	Veredelung v. Energieträgern durch Stoffumwandlung	Energiewandlung bei Herstellung technischer Produkte	Regenerative Energie	Fusion
Arbeiten und Problemgebiete					
Verhinderung d. Entstehung v. Reststoffen	TB ¹⁾ NI	TB NI	Ge NI	–	oP
Reduzierung u. Bindung v. Reststoffen	TA TB	TB Ge	NI	–	oP
Behandlung v. Reststoffen (Nutzen und Verbleib)	TB Ge	NI	oP	–	oP
Biol. Wirkung v. Reststoffen	Ge	oP	oP	–	oP
Technikfolgenabschätzung	TA	oP	oP	oP	oP

1) TA Technisches Verfahren in Anwendung; TB Technisches Verfahren in Bearbeitung; Ge Grundlagenuntersuchung erforderlich; NI Neue Ideen notwendig; oP offenes Problem.

Kraftwerkstechnik die am wenigsten schwierigen Probleme; sie können mit überschaubarem Forschungs- und Entwicklungsbedarf sowie unter Weiterentwicklung bekannter und bestehender Verfahren oder Methoden gelöst werden. Bei der Veredelung von Energieträgern durch Stoffumwandlung und bei der Energiewandlung im Rahmen der Herstellung technischer Produkte sind für verschiedene Themenbereiche, wie z. B. Meßtechnik, Sicherheitstechnik und auch Optimierung, neue Denkipulse und Ideen erforderlich. Die offenen Probleme schließlich häufen sich im Bereich der regenerativen Energieträger und vor allem bei der Kernfusion. Hier sind zahlreiche sicherheitstechnische Fragen noch offen, wenn auch heute bei den Medien und in der technisch nicht – oder zumindest nicht genügend – vorgebildeten Bevölkerung eine gegenteilige Meinung besteht. Letzteres hat teilweise einen psychologischen Grund, da in der Öffentlichkeit sicherheitstechnische Probleme umso immanenter und bewußter werden, je geringer die zeitliche Entfernung zur großtechnischen Realisierung eines Verfahrens ist.

Bei den umweltrelevanten Themen (Tab. 2) tritt die Häufung der ungelösten Probleme im rechten unteren Bereich der Matrix, d. h. bei zukünftigen Umwandlungsmethoden und bei Fragen nach der biologischen Wirkung von Reststoffen sowie bei der Technikfolgen -Abschätzung noch deutlicher zutage. Besonders die biologische Wirkung von Reststoffen ist ein Komplex, der vom Ingenieur allein nicht und vom Chemiker auch nur unter ganz bestimmten Voraussetzungen behandelt werden kann. Die umweltpolitisch häufig so sehr kritisierte Kraftwerkstechnik hat zumindest den Vorteil, daß Umweltbelastung und sicherheitstechnische Risiken wohl kalkulierbar sind und sich wirksame Maßnahmen für einen umweltfreund-

lichen und sicheren Betrieb bereits in Anwendung befinden.

Regenerative Energieträger werfen zwar keine Fragen hinsichtlich der Entstehung, Bindung, Behandlung oder biologischen Wirkung von Reststoffen auf, ruft man sich aber den in Kap. 3.5 diskutierten Materialbedarf für den Betrieb von Solaranlagen mit Wasserstoff-Erzeugung in Erinnerung, so können die Technikfolgen heute noch kaum abgeschätzt werden. Dies gilt auch ohne Berücksichtigung der Kosten für diesen Energieträger.

In der Kernfusion liegt sicher noch ein langer, arbeitsreicher Weg vor den Ingenieuren, auch wenn es jüngst gelungen ist, eine Plasmatemperatur von über 200 000 000 K für mehr als 100 ms aufrechtzuerhalten. Der Schritt von der energieverbrauchenden Großversuchsanlage zur Erzeugung von Energieüberschuß ist noch weit und die Quantität wie Qualität der durch die Fusion radioaktiv werdenden Stoffe sind noch längst nicht hinreichend bekannt. Solange die Fusion Lithium für die Energiewandlung benötigt, ist sie wegen der begrenzten Vorräte dieses Stoffes längst nicht unerschöpflich und das bei der Fusion anfallende radioaktive Tritium kann wegen der großen Menge nicht mehr in Beton gebunden werden, wie das jetzt bei der Wiederaufbereitung von Kernspaltstoffen vorgesehen ist.

In der Technik hat man nur dann gute Aussicht auf Erfolg, wenn man schrittweise vorgeht. Dies wird und muß auch für die Fragen in der Matrix der Tab. 2 gelten. Ausgehend von der bekannten Technik, die gleichzeitig den finanziellen, stützenden Rahmen für die neue Forschung und Entwicklung liefern muß, kann man nur allmählich – immer wieder rückversichernd auf zwischenzeitlich gemachte Erfahrungen – zu hoffentlich in nicht allzu ferner Zukunft zur Verfügung stehenden neuen Energieträgern vordringen, die zumindest zu Beginn ihrer technischen Nutzung für Jahrzehnte nur additiv zu sehen sind, wie uns die technische Evolution in den vergangenen 200 bis 300 Jahren lehrte.

Aber nicht nur die Forschung für diese neuen Energieträger, auch die Entwicklung zur wirtschaftlichen Nutzung heute bereits bekannter, aber doch noch zukünftiger Energiewandlungsverfahren – wie z. B. die Veredelung von Energieträgern – benötigt das Wissen und die Mitarbeit des Verfahrenstechnikers. Vielleicht wäre manche Entwicklung in der Kraftwerkstechnik, insbesondere was die Reduzierung, Bindung und Behandlung von Reststoffen betrifft, in den vergangenen Jahrzehnten anders gelaufen, wenn sich die verfahrenstechnische Industrie stärker und unmittelbarer als bisher geschehen in der Kraftwerkstechnik, und damit in den Prozessen zur Energiewandlung, engagiert hätte. Das Koordinationsbemühen im Rahmen einer Energieverfahrenstechnik könnte hier vielleicht doch positive Impulse geben.

Dieser Ausblick auf zukünftige Entwicklungen in der Energietechnik und die dabei benötigte Zuarbeit der Verfahrenstechnik sollte auch anregen, über die Ausbildung junger Inge-

nieure nachzudenken, die, wenn sie von heute gezählt in vier oder fünf Jahren die Hochschule verlassen, bis zum Jahre 2020 oder 2030 die Entwicklung in der Industrie bestimmen und tragen müssen.

Ende der sechziger, Anfang der siebziger Jahre wurden unter dem Eindruck einer stürmischen Entwicklung der Nukleartechnik Lehrstühle und Institute für Kerntechnik geschaffen. Die Professoren auf diesen Lehrstühlen klagen heute über einen Mangel an Studenten trotz großer Zahlen von Studienanfängern im Maschinenwesen. Dies hängt z. T. sicher mit den politischen Schwierigkeiten zusammen, denen sich die Kerntechnik gegenüber sieht und ist z. T. auch auf den momentan sehr beschränkten Markt für kerntechnische Anlagen zurückzuführen. Ein wesentlicher Grund dafür, daß dieses Studium nicht mehr in ausreichendem Maße angenommen wird, ist aber auch in der zu starken Spezialisierung auf ein enges Fachgebiet zu suchen, die dem Studenten und späteren Ingenieur wenig Flexibilität bei der Arbeitsplatzsuche erlaubt. Es ließen sich noch verschiedene andere Beispiele für eine an unseren Hochschulen in der Ausbildung zu starke Spezialisierung anführen.

Der gut ausgebildete Verfahrenstechniker hatte auch in Jahren, in denen die chemische Industrie nicht in dem gewünschten Maße florierte und deshalb einen Einstellungsstopp verfügte, nie Schwierigkeiten, einen seinem Wissen entsprechenden Arbeitsplatz zu finden.

Andererseits soll aber hier auch nicht der Einrichtung einer Studienrichtung Energieverfahrenstechnik das Wort geredet werden. Vielmehr sei auf die klassische Rolle der Verfahrenstechnik als Mittler zwischen Maschinenbau und Chemie verwiesen. Ein in den Grundprozessen sowie in den Grundlagenfächern Thermodynamik, Wärme- und Stoffübertragung und Strömungsmechanik gut ausgebildeter Verfahrenstechniker wird sich sehr rasch in die speziellen Probleme der Energietechnik einarbeiten, andererseits wird aber der zukünftige Energietechniker gut daran tun, bei seiner Ausbildung auch verfahrenstechnische Fächer zu hören, deren Wissen sich zu erarbeiten und vor allem die spezielle Denkweise dieser Disziplin zu erlernen.

Eingegangen am 8. Dezember 1986 [B 5351]

Literatur

- [1] *Bitterlich, E.*: Die Wirbelschicht-Technologie als Prozeß zur umweltfreundlichen Energie-Erzeugung, Fachkolloquium der Fakultät für Maschinenwesen, Univ. Hannover, 8. Februar 1980.
- [2] Steinkohlebergbauverein, Jahresbericht 1984.
- [3] *Frewer, H.*: Das Hochtemperatur-Modulkonzept der KWU-Gruppe, Symposium „Einsatzmöglichkeiten von Hochtemperaturreaktoren kleiner Leistung“, Düsseldorf, November 1981.
- [4] *Nisch, J.*: Wasserstoff als Energieträger – Chancen und Probleme, *Brennst.-Wärme-Kraft* 38 (1986) Nr. 1/2, S. 39–43.