

6 Systemtechnische Überlegungen zur Energieflußoptimierung in mittelständischen Unternehmen

Prof. Dr.-Ing. F. Mayinger, TU München

Dipl.-Ing. W. Götz, TU München

Dipl.-Ing. F. Schmidt, Nachtmann GmbH

Dipl.-Ing. K. Voit, Seltmann GmbH

1. Einleitung

Am festlich gedeckten Tisch, beim Betrachten des formschönen und vor allem auch unmittelbar bevorstehende Gaumenfreuden versprechenden Porzellans, denkt wohl kaum jemand an die zur Herstellung jedes einzelnen Stückes notwendigen Fertigungsabläufe und schon gar nicht bringt man damit systemtechnische Probleme und Aufgaben in Verbindung. Schließlich spricht man ja auch heute noch häufig von Porzellanmanufaktur und konzentriert damit seine Vorstellungen auf die handwerkliche Kunst, die für schöne Gedecke nötig ist.

Noch weniger kommt man bei der Betrachtung und Bewunderung einer Vase oder Schale aus Bleikristallglas auf solch profane, ingenieurwissenschaftliche Gedanken, wie Verbesserung des Produktionsprozesses durch systemtechnische Analyse, die sich schließlich, wie wir sehen werden, auf das scheinbar einfache und selbstverständliche Problem des Wärmeübergangs zwischen dem noch fließfähigen, heißen Bleikristallglas und der Preßform fokussiert.

Porzellan- und auch Glaswaren-Hersteller sind häufig mittelständische Unternehmen, und man unterstellt, daß die systemtechnischen Aufgaben beim Mittelstand noch nicht so ausgeprägt und gravierend wären, wie bei den Großunternehmen mit ihren komplizierter und vermaschter aufgebauten, mit aufwendigen Regelungen versehenen, Produktionsanlagen. Für seine Konkurrenzfähigkeit am Markt muß sich der Mittelstand aber heute hoch rationeller Produktionsanlagen bedienen, was aufwendige Technik, engen Verbund der Apparate und Maschinen, mit daraus wieder resultierender komplizierter Regelungstechnik bedeutet.

Kontakte zwischen dem Lehrstuhl A für Thermodynamik der Technischen Universität München und mittelständischen Unternehmen zeigten schon früh nicht nur eine Fülle systemtechnischer Aufgaben sondern vor allem auch eine so große Aufgeschlossenheit der Unternehmensleitung und des technischen Personals für die Notwendigkeit der Optimierung von Energiefluß und Reststoffverwertung, sowie für die Qualitätsverbesserung und -sicherung durch systemtechnische, den Fertigungsprozeß gestaltende Maßnahmen.

Der Bayerische Forschungsverbund Systemtechnik ermöglichte dem Lehrstuhl A für Thermodynamik eine enge Kooperation mit den Firmen Seltmann und Nachtmann, beide mit dem Hauptsitz in Weiden. Das technische Personal dieser Unternehmen brachte in diese Kooperation das Knowhow der Praxis ein und der Lehrstuhl steuerte seine wissenschaftlichen Erkenntnisse und sein theoretisches Wissen bei. So ergab sich durch persönliche Zusammenarbeit von Mann zu Mann - Praktiker und Hochschulangehöriger - schon nach wenigen Monaten eine äußerst präzisierte Aufgabenstellung für Produktionsprozesse der beiden Unternehmen. In der Zusammenarbeit mit dem Porzellanhersteller Seltmann hieß diese Aufgabenstellung in einem ersten Teilschritt, den Energiefluß eines Zweigwerkes zu verbessern und zusammen mit dem Bleikristall-Glashersteller Nachtmann, konzentrierten sich die Bemühungen um eine systemtechnische Optimierung auf die Qualitätssicherung, was wiederum indirekt zu erheblichen Energieeinsparungen führt.

2. Verbesserung des Energieflusses und Verringerung des Primärenergieeinsatzes am Beispiel einer Porzellan-Produktionsstätte

Den Stoff- und Energiefluß bei der Porzellan-Produktion im Zweigwerk Krummennaab der Firma Seltmann, zeigt Abb. 1. Die geformten Porzellantteile, wie Tassen oder Teller, kommen zunächst in den Trockner und gelangen von dort auf feuerfeste Wagen gestapelt in einen der drei Tunnelöfen, den sie langsam durchwandern. Das Porzellan erfährt je nach Dekor, bis zu vier Brennvorgänge.

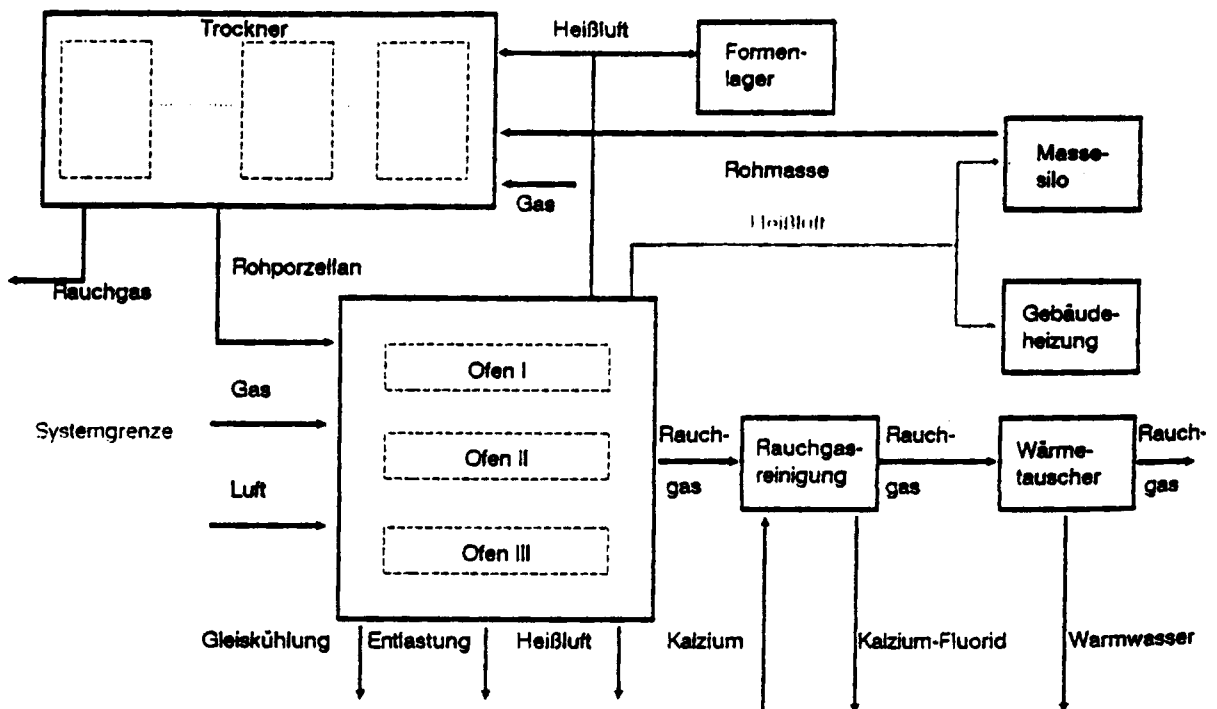


Abb. 1 Energieflußdiagramm der Porzellanproduktion

Sehr aufwendig stellt sich die Führung der Hilfsstoffe für die Energieversorgung und für die Gewährleistung der einzuhaltenden Ofenatmosphäre dar. Der Ofen wird mit Erdgas beheizt. Das entstehende Rauchgas gelangt über eine Rauchgasreinigung und einen Wärmetauscher ins Freie. In der Rauchgasreinigung muß Kalzium zugeführt werden, welches das Fluor im Rauchgas bindet und als Kalziumfluorid wieder abgezogen wird. Nur ein geringer Teil der dem Ofen durch Verbrennung von Erdgas zugeführten Energie, kann als Prozeßwärme unmittelbar im Ofen - zum Brennen des Gutes - oder in nachgeschalteten Apparaten genutzt werden. Dies ist nur teilweise prozeßbedingt, unnötige Verluste entstehen aufgrund der bisherigen konstruktiven Gegebenheiten und wegen zeitlicher Differenzen zwischen Energieangebot und -nachfrage. Dabei wurde die Anlage bei ihrer Konzipierung durchaus energiebewußt ausgelegt. So wird z.B. die, durch die Kühlung der Ofenwände anfallende Heißluft an verschiedenen Stellen, angefangen von den Trocknern, über die Formenlager und das Masse-Silo, bis hin zur Gebäudeheizung genutzt. Auch ein Teil der Wärme, die das aus dem Brennraum der Öfen kommende Rauchgas mit sich führt, wird über einen Wärmetauscher an Warmwasser zur Gebäudeheizung und zur Wasserversorgung abgegeben. Trotzdem ist dieser Wärmehaushalt noch nicht optimal organisiert.

Bei systemtechnischen Überlegungen liegt es nahe, zuerst das Kernstück einer Anlage, aus der Sicht des Energieumsatzes gesehen, in diesem Fall die Tunnelöfen mit ihren Gasbrennern, kritisch zu betrachten. Der Praktiker mahnt dabei aber sofort mit Recht zu Vorsicht, da Wärmeeinbringung, Temperaturführung und stoffliche Konzentrationen im Rauchgas eng gekoppelt sind mit der Qualität des Produktes.

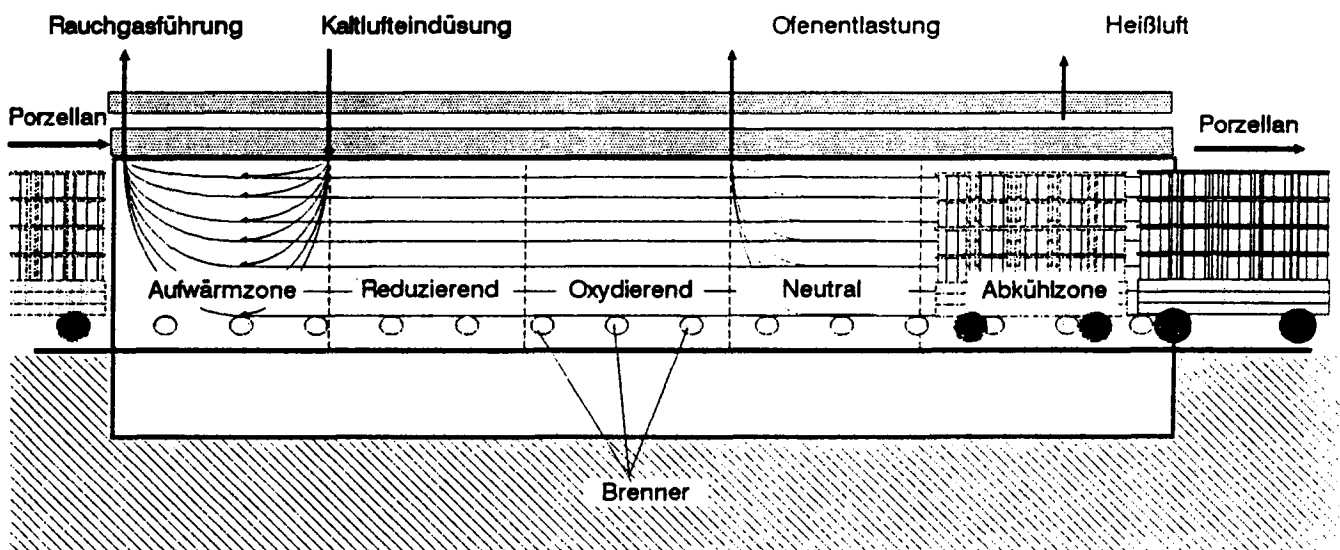


Abb. 2 Schema eines Porzellanbrennofens

Wie Abb. 2 zeigt, muß die Gasatmosphäre, d.h. deren chemische Zusammensetzung über die Länge des Ofens sorgfältig geregelt werden. Das auf Rollwagen langsam durch den Tunnelofen wandernde Gut passiert zunächst eine Aufwärmzone, die strömungstechnisch mittels rückfließender Luft sorgfältig gegen die sich anschließende Zone mit reduzierender Atmosphäre getrennt ist. In dieser Zone mit reduzierender Atmosphäre, wird unter Luftmangel verbrannt, so daß das im Rohporzellan befindliche 3-wertige Eisen, das dem Porzellan einen bräunlichen Farbton verleihen würde, zu FeO reduziert wird, das die Farbgebung in Richtung weiß-grün beeinflusst.

In der dann folgenden oxidierenden Atmosphäre wird weitere Verbrennungsluft zugegeben und das Gas möglichst vollständig verbrannt. Das Gut erreicht seine Brenntemperatur, durchläuft eine neutrale Beruhigungszone, bis es schließlich in die Abkühlzone gelangt. Die Verluste aus dem eigentlichen Reaktionsraum, dem Brennraum, sind nicht so groß, wie man zunächst annehmen könnte. Sie betragen, wie aus Abb. 3 hervorgeht, etwas über 30 und setzen sich zusammen aus der Enthalpie des abströmenden Rauchgases, der notwendigen Wärmeabfuhr für die Gleiskühlung, den Ausfahrverlusten und den sogenannten Entlastungsmaßnahmen, bei denen Gas zur Druckhaltung abgelassen werden muß. Die weitaus größte Energie trägt die den Raum um die drei Tunnelöfen umspülende und kühlende Luft mit sich, die als Heißluft nur etwa zur Hälfte genutzt wird. Schließlich gehen noch 20 Strahlung an die Umgebung verloren. Die Aufteilung dieses Energieflusses war bei Beginn unserer Arbeiten keineswegs bekannt. Wir mußten deshalb nach ersten Überlegungen zunächst einmal eine sorgfältige Energieflußanalyse anstellen, dadurch daß auf allen Energiepfaden die Mengenströme sowie Temperaturänderungen und Temperaturdifferenzen über mehrere Wochen in der gesamten oben beschriebenen Anlage gemessen wurden.

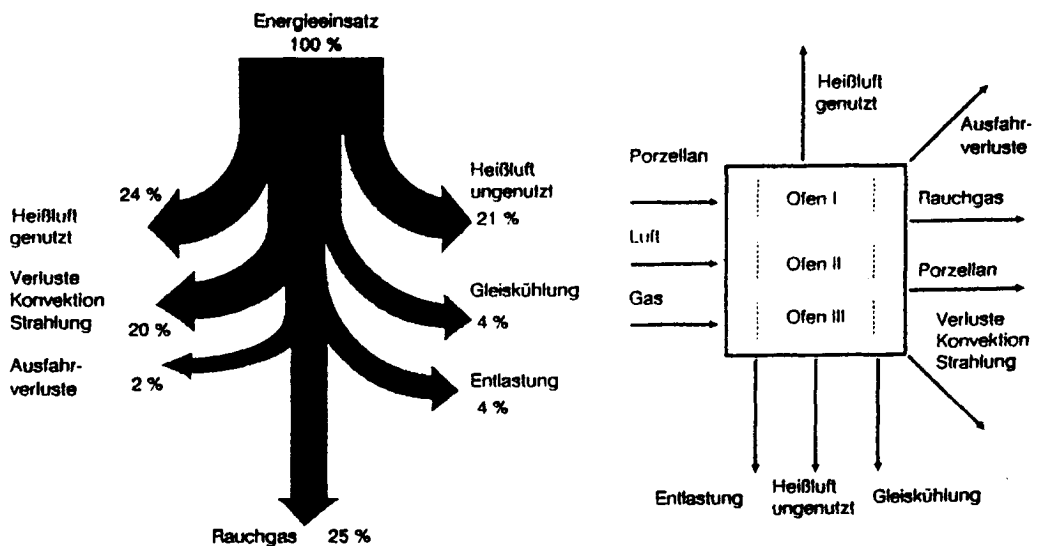


Abb. 3 Energiebilanz der drei Brennöfen

Aus der Erkenntnis, daß 50% des Primärenergieeinsatzes über die Heißluft, also über die Mantelkühlung der Tunnelöfen den eigentlichen Reaktionsprozeß verläßt, wurde die Nutzung dieser Heißluft experimentell und auch theoretisch näher untersucht. Ein großer Teil dieser Heißluft wird, wie aus Abb. 1 zu erkennen war, den Trocknern zugeführt. Die von uns über diese Trockner gemessene Energiebilanz, zeigt einen zunächst verschwindend geringen Ausnutzungsgrad von nur 14% des Energieeinsatzes, nämlich nur diejenige Wärme, die zum Verdampfen des aus dem Porzellangut auszutreibenden Wassers verwendet wird, ist im eigentlichen Sinne prozeßrelevant. Wie Abb. 4 zeigt, beinhaltet die aus dem Trockner abziehende feuchte Luft mehr als 40% des Energieeinsatzes, Verluste durch Konvektion und Strahlung machen 22% aus und immerhin 17% des Energieeinsatzes rühren von Undichtigkeiten in diesem Anlageteil her. Die Wärme, die das ausgeschleuste und getrocknete Porzellan mit sich bringt, ist mit 4% des Energieeinsatzes relativ gering.

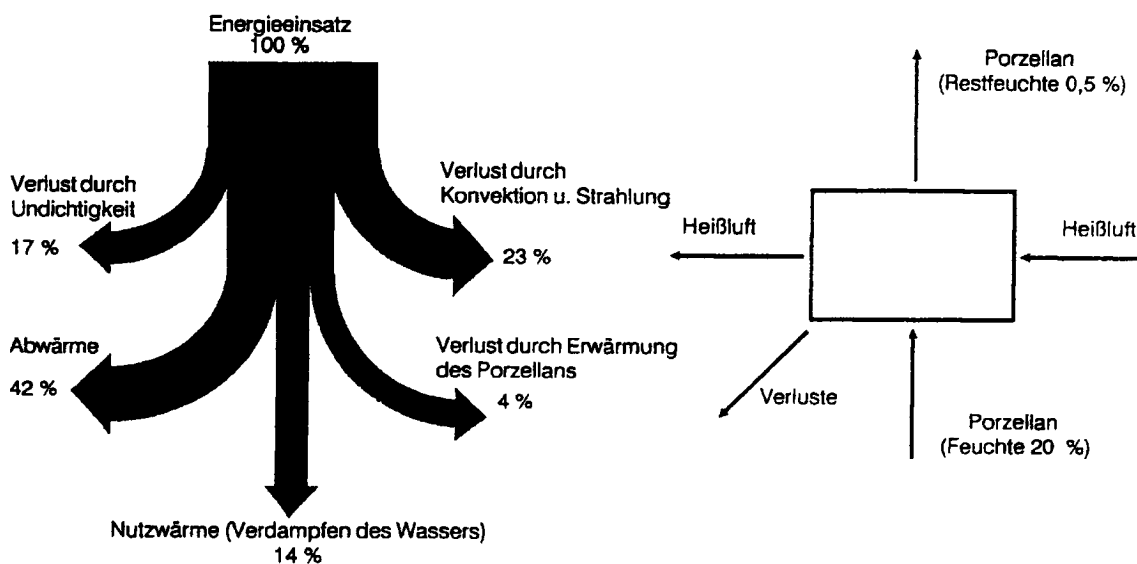


Abb. 4 Energiebilanz an einem Porzellantrockner

Wollte man die Verluste des Trockners, die durch Konvektion, Strahlung und Undichtigkeiten entstehen, verringern, so würde das erhebliche Umbauen bzw. aufwendige Isolierungen erfordern. Die Wärme in der feuchten Abluft ist wenig zu nutzen, da sie einmal bei mäßigem Temperaturniveau vorliegt, und zum anderen das bei dem Wärmeentzug gleichzeitig ausfallende Kondensat, erhebliche Korrosionsprobleme in den wärmetauschenden

Apparaten mit sich brächte.

Damit mußte sich der systemtechnische Ansatz auf die Bedarfsanalyse des Trockners zurückziehen. Wie Abb. 1 zu entnehmen war, wird dem Trockner nicht nur Heißluft aus den Tunnelöfen zugeführt, die dort mit Abwärme gespeist wird, sondern der derzeitige Betrieb des Trockners erfordert auch den Einsatz von Erdgas und dies nicht so sehr, um aus prozeßtechnischen Gründen die Temperatur der Trocknerluft anzuheben, sondern um den Energiebedarf des Trockners zu decken. Letzteres könnte aber, wie unsere Messungen und Analysen ergaben, weit über das geforderte Maß hinaus von der aus den Tunnelöfen sozusagen kostenlos anfallenden und über die Heißluft transportierten Abwärme erfolgen.

Abb. 5 zeigt über einen Zeitraum von 5 Wochen, den von uns durch sorgfältige Messungen ermittelten Energiebedarf der Trockneranlage, dargestellt in Form des Heißluftbedarfes bzw. Heißluftangebots als Wärmeäquivalent. Die Tunnelöfen laufen 24 Stunden am Tag und 7 Tage in der Woche und liefern $65.000 \frac{m^3}{h}$ Heißluft. Die Trockner werden absatzweise betrieben und ihr Energiebedarf ändert sich mit der Art und Menge des eingesetzten Gutes. Von den angebotenen $65.000 \frac{m^3}{h}$ Heißluft würden selbst bei Spitzenbedarf 26 bis 27.000 für die Trockner der Hohlgeschirrtrockner ausreichen.

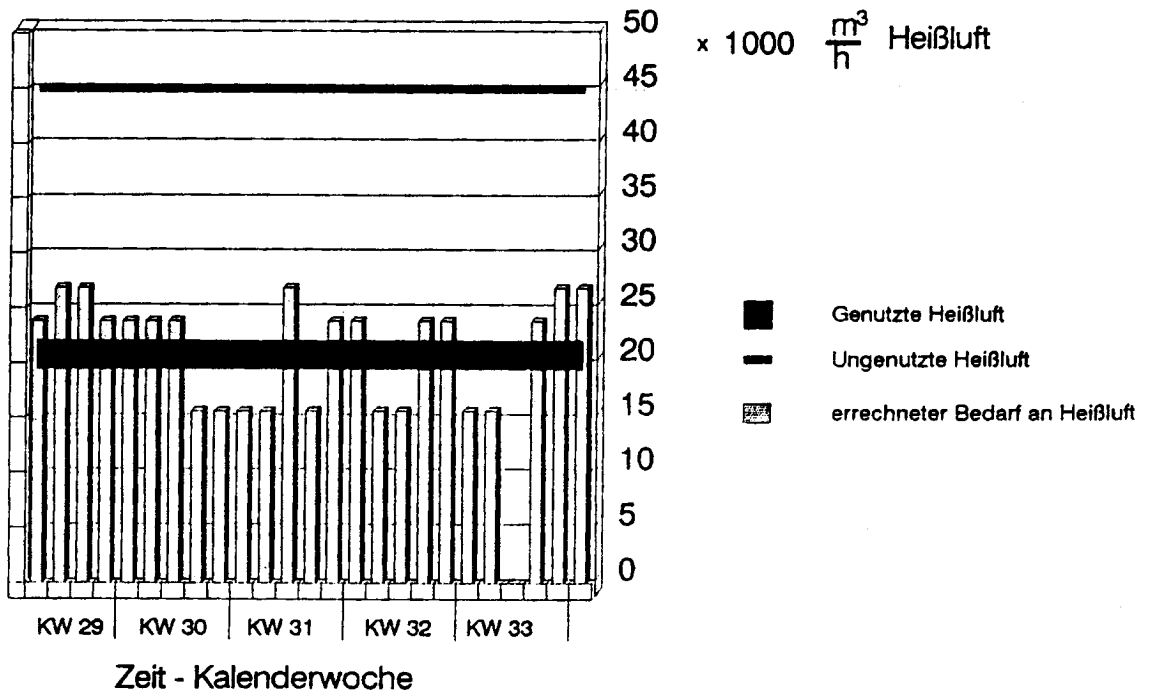


Abb. 5. Bedarfsanalyse Heißluftbedarf Hohlgeschirrtrockner

Der Grund dafür, daß den Trocknern nicht in ausreichendem Maße Heißluft zugeführt werden kann, liegt an dem unzureichend dimensionierten und strömungsmechanisch nicht abgestimmten Heißluftversorgungsnetz. Durch eine Optimierung dieses Rohrsystems könnte der Bedarf der Trockner mit Heißluft gänzlich gedeckt werden. Die jetzt noch in Betrieb befindliche Gaszusatzheizung wäre damit völlig überflüssig. Die Wärme der darüber hinaus gehenden Heißluftmenge kann entweder für andere Prozessschritte herangezogen oder auch als nutzbare Abwärme an außenstehende Abnehmer verkauft werden. Sollte letzteres aus Standortgegebenheiten nicht möglich sein, so muß die Systemanalyse wieder zum Energiehaushalt der Tunnelöfen zurückkehren und es müssen Überlegungen angestellt werden, inwieweit die Kühlung der Brennräume und damit die anfallende Heißluftmenge reduziert werden können. Dies ist allerdings keine einfache Energiebilanz, vielmehr muß der Stoffhaushalt des Brennraumes mit herangezogen werden, da die einzelnen Reaktionszonen mit ihren reduzierenden, oxidierenden und neutralen Atmosphären zu gewährleisten sind. Überlegungen hierzu werden die Aufgabe unserer weiteren Arbeiten in diesem Teil des Projektes sein.

3. Untersuchungen an einer Produktionsstätte für Bleikristallglas

Energetechnisch anders liegen die Verhältnisse im zweiten Bereich unseres Projektes, in dem wir den Energie- und Stoff-Fluß sowie die Qualitätssicherung zusammen mit dem Bleikristall-Glashersteller Nachtmann in einer Glasschmelz- und Formanlage untersuchten (Abb. 6).

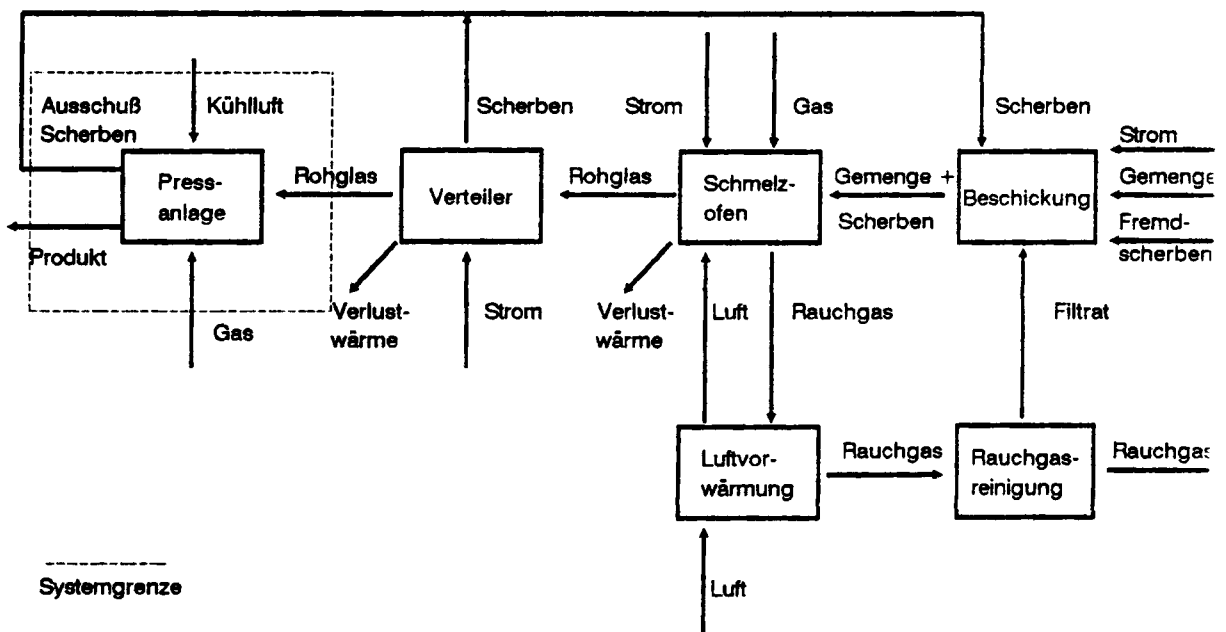


Abb. 6. Energieflußdiagramm der Bleikristallglasproduktionsanlage

Zwar betragen die Ofen- und Abgasverluste auch hier mehr als 70 Primärenergie, ein Teil dieser Verluste wird aber über Regenerativ-Wärmetauscher bereits dem Prozeß wieder zugeführt. Als Schlüssel zur Verbesserung des Prozesses ist hier vielmehr die Verringerung des beim letzten Produktionsschritt, nämlich beim Gießen und Pressen, des eigentlichen Produktes entstehenden Ausschusses zu sehen, also die Verringerung der Anzahl von gefertigten Stücken, die von der Qualitätskontrolle zurückgewiesen, zu Scherben zerschlagen und wieder der Glasschmelze am Eingang zugeführt werden müssen. Diese zurückzuführenden Scherben beinhalten, wie Abb. 6 u. 7 verdeutlicht, die gesamte Produktionsenergie einschließlich der vorher erwähnten Abwärmeverluste. Die Scherben repräsentieren also hinsichtlich des Energiehaushaltes einen großen Multiplikationsfaktor bei der Wärme-flußoptimierung.

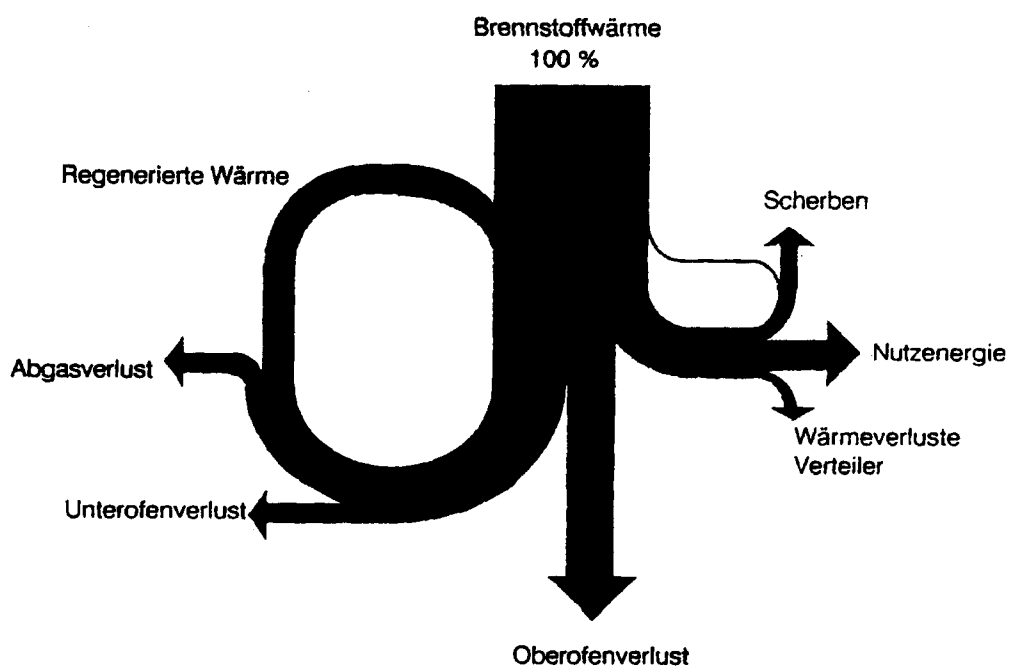


Abb. 7. Prinzipielle Energiebilanz einer Glasschmelzanlage

Der Käufer stellt an die Qualität und insbesondere an die äußere Beschaffenheit von Bleikristall-Glasprodukten hohe Anforderungen. Beim Pressvorgang verschiedener Produkte, entstand auf der äußeren Oberfläche des Bleikristallglases häufig eine leichte Riffelung oder Welligkeit, die aus Qualitätsgründen nicht toleriert werden kann. Schuld daran ist, daß die Temperatur der Oberfläche der Form, in die der Glasrohling über einen Stempel gepreßt wird, während dieses Preß- bzw. Fließvorganges an kritischen Stellen von der Solltemperatur nach unten abwich. Dies verursachte ein zu

frühes Erstarren, nämlich noch während der letzten Phase des Preßvorganges, was die Riffelung bzw. die Unebenheit auf der äußeren Glasoberfläche zur Folge hat. Mit dieser Schilderung ist bereits ein Teil des Ergebnisses vorweggenommen, das in unseren systemtechnischen Analysen erst erarbeitet werden mußte.

Der Preßvorgang läuft instationär so ab, daß eine gewisse Menge geschmolzenen Bleikristallglases in die Form gegeben wird und ein von oben kommender Verdrängungskörper dann diese zunächst am Boden der Form liegende Schmelze seitlich nach oben drückt, wodurch sich ein Fließvorgang des Glases längs der Wand des Formkörpers einstellt und der gewünschte Glashohlkörper entsteht. Der instationäre Wärmetransport während dieses Fließvorganges im Formkörper läßt sich heute mit den verfügbaren elektronischen Hochleistungsrechnern und mit dem Wissen eines einigermaßen gut ausgebildeten Thermodynamikers, der die Gesetze der Wärmeleitung beherrscht, gut berechnen. Wenig Informationen liegen jedoch vor über den Wärmeübergang von der Glasseite an die Oberfläche des Formkörpers.

Wir legten unsere Untersuchungen deshalb zweigleisig an, nämlich theoretisch und experimentell.

Die Differentialgleichung für den zweidimensionalen instationären Wärmetransport in einem rotationssymmetrischen Körper, wie der hier zu betrachtenden Preßform, ist seit langem bekannt.

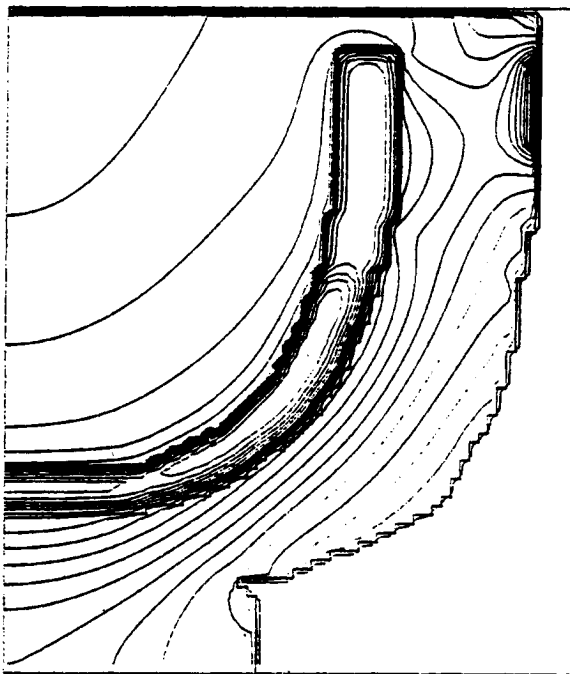
$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{a}{\lambda} \dot{q}$$

Analytische Lösungen dafür existieren aber nur wenige, und die für sehr vereinfachte Fälle. Die numerische Integration auf einer heutigen modernen elektronischen Rechenmaschine erfordert Erfahrung bei der Umwandlung der Differentialgleichung in eine geeignete Differenzgleichung und insbesondere bei der Nodalisierung und bei der Beachtung der Konvergenzkriterien beim numerischen Differenzenverfahren. Dies ist Sache der wissenschaftlichen Seite.

Die Lösung von partiellen Differentialgleichungen, wie der vorliegenden, werden bekanntlich von den Randbedingungen bestimmt. Eine dieser Randbedingungen ist der Wärmeübergang vom fließenden und gepreßten Glasgut an die innere Oberfläche der Form. Hierfür wurden zunächst Näherungsansätze gemacht, parallel dazu aber eine Preßform aus der Produktion mit einer Vielzahl von Meßsonden versehen. Diese so instrumentierte Preßform

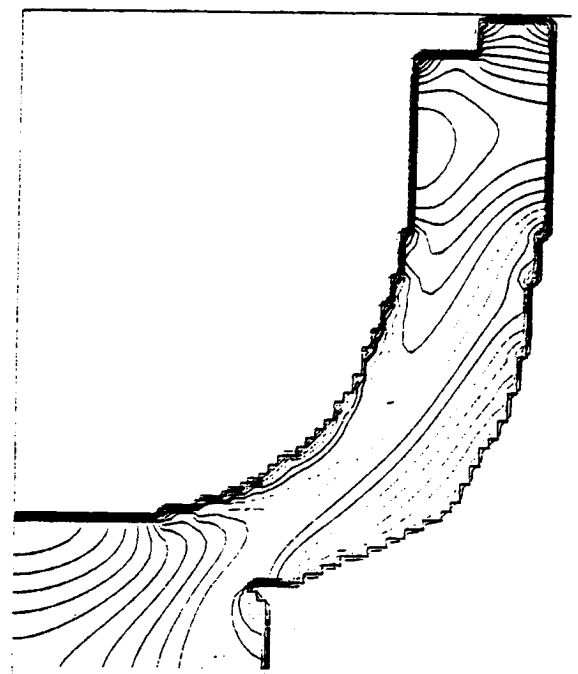
wurde dann wieder in den Produktionsprozeß eingebracht und es wurden die zeitlichen Temperaturänderungen insbesondere an ihrer inneren Oberfläche während mehrerer Preßvorgänge gemessen.

Die berechnete Temperaturverteilung zu zwei ausgewählten Zeitpunkten während des Produktionsprozesses zeigen die Abb. 8 und 9. Diese beiden Abbildungen vermitteln den Temperaturverlauf in der Preßform zu zwei verschiedenen Zeitpunkten während des Produktionsverlaufes. Zum Zeitpunkt der Abbildung 8 (256s) befindet sich der Glaspreßling noch in der Form und man erkennt, daß die äußere Wand des Preßlings zu diesem Zeitpunkt - kurz vor dem Ausheben aus der Form - nicht ganz isotherm ist. Der Boden befindet sich noch auf etwa 1000 bis 1200 K während das Glasgefäß auf der seitlichen äußeren Oberfläche bereits auf 700 bis 900 K abgekühlt ist. Der Grund für diese Temperaturdifferenz längs der äußeren Oberfläche während des Preßvorgangs ist einmal der höhere Wärmeübergang in der unteren Hälfte der seitlichen Zone infolge des Fließprozesses aber auch die größere, die Temperatur besser stabilisierende Masse der Form in ihrem unteren Bereich.



398.0 < T < 400.0 (K)	800.0 < T < 700.0 (K)
400.0 < T < 450.0 (K)	700.0 < T < 800.0 (K)
450.0 < T < 500.0 (K)	900.0 < T < 1000.0 (K)
500.0 < T < 550.0 (K)	1100.0 < T < 1200.0 (K)
550.0 < T < 600.0 (K)	1200.0 < T < 1300.0 (K)

Zeit = 256.0 sec.



395.0 < T < 400.0 (K)	800.0 < T < 700.0 (K)
400.0 < T < 450.0 (K)	700.0 < T < 800.0 (K)
450.0 < T < 500.0 (K)	900.0 < T < 1000.0 (K)
500.0 < T < 550.0 (K)	1100.0 < T < 1200.0 (K)
550.0 < T < 600.0 (K)	1200.0 < T < 1300.0 (K)

Zeit = 296.0 sec.

Abb. 8 / 9. Berechneter Temperaturverlauf in einer Glaspreßform

Diese größere Wärmespeicherung im unteren Bereich kann deutlich aus Abb. 9 abgelesen werden. Diese Abbildung zeigt den Temperaturzustand der Form kurz nach dem Ausheben des Glas- Preßlings. Die Form ist an ihrer seitlich aufsteigenden Wand auf rund 400 K abgesunken, während sie am Boden noch Energie bei einer Temperatur von 700 bis 800 K vorhält.

Der Preßling kühlt also während des Fließprozesses im unteren und mittleren Bereich der aufsteigenden Seiten zu rasch ab, was zu Unregelmäßigkeiten und Riffelungen an der Oberfläche beim Erstarren führt. Wir sind zur Zeit dabei Berechnungen für Abhilfe- und Verbesserungsmaßnahmen durchzuführen. Eine naheliegende Lösung ist die Verstärkung der seitlichen Wand der Form im Übergang vom Bodenbereich zum senkrechten Teil.

Wie gut oder wie schlecht nun diese Berechnungen mit den während des Produktionsprozesses in der Form tatsächlich gemessenen Temperaturen übereinstimmen zeigt Abb. 10. Es ist dort an einer Stelle im Bodenbereich der Form, die in der linken unteren Skizze der Abb. 10 mit einem Punkt bezeichnet ist, der gemessene und der berechnete zeitliche Temperaturverlauf gegenübergestellt. Der maximale Unterschied zwischen Messung und Rechnung beträgt 20 K. Die Vorhersage ist also relativ genau, verglichen mit den Unregelmäßigkeiten in der Form, die sich auf einige hundert Kelvin belaufen.

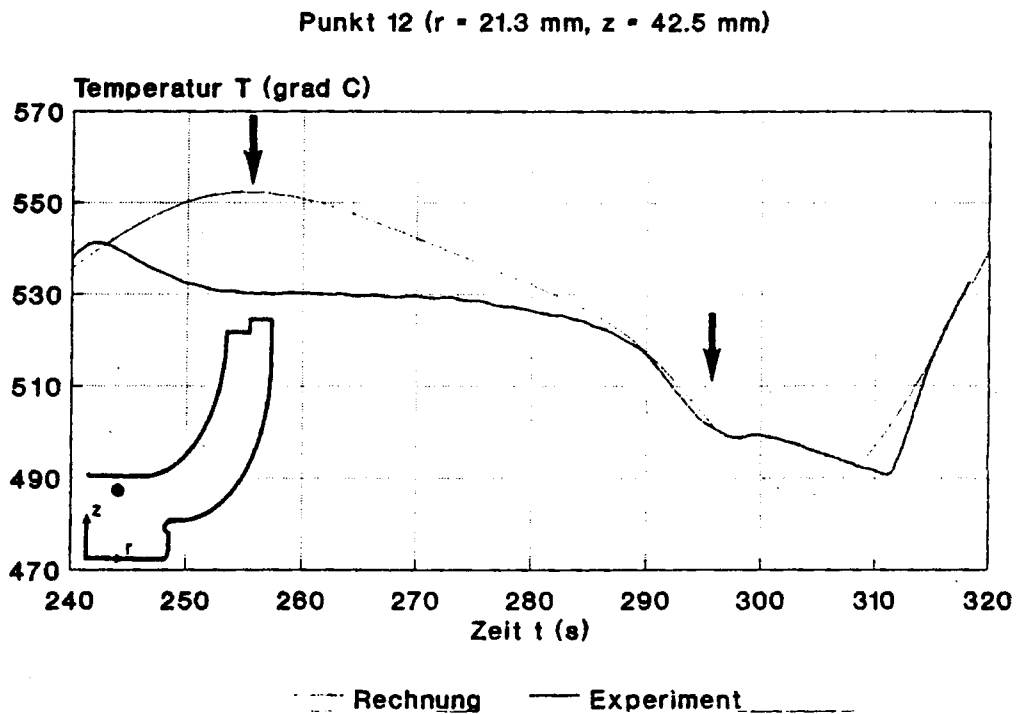


Abb. 10. Vergleich von Messung und Rechnung

Rechnung und Experiment werden im weiteren Verlauf unserer Arbeiten die Massenverteilung in der Form neu festlegen und so die Qualität des Produktes besser sichern. Will man aus Kostengründen die alten Formen nicht verwerfen, so kann eine gezielte örtliche Vorwärmung der Form im unteren Teil des seitlichen Halsbereiches durch genau plazierte Gasflammen in den Preßpausen ebenfalls zu einer Qualitätssicherung führen. Auch hier gestattet die Rechnung eine zuverlässige Vorhersage der notwendigen Einwirkungsdauer und Brennstärke solcher Gasflammen.

Im weiteren Verlauf der Arbeiten soll dann der Energieverbund des gesamten Fertigungsprozesses nochmals sorgfältig überdacht und soweit wie möglich optimiert werden.

4. Mittelstand und Hochschule

Die Kooperation zwischen Mittelstand und Hochschule ist heute noch sehr unterschiedlich und sicher in vielen Bereichen erheblich verbesserungswürdig. Während bei spangebenden Produktionsprozessen häufig eine fruchtbare Zusammenarbeit zu beobachten ist, stehen sich Akademiker und Praktiker bei Prozessen, auf die in starkem Maße die Gesetze der Wärme- und Stoffübertragung sowie der Thermodynamik einwirken, häufig noch skeptisch gegenüber. Dies hat fachliche und persönliche Gründe. Fachlich ist anzuführen, daß diese Gesetze häufig so kompliziert sind, daß sie ein Ingenieur mit zwar gutem Allgemeinwissen, der aber nicht Spezialist auf den genannten Gebieten ist, nicht mehr übersieht, und damit spielt die persönliche Komponente mit herein, daß nämlich eine hinreichend tragfähige Vertrauensbasis zwischen Praxis und Wissenschaft vorhanden sein muß oder gebildet werden muß, um eine erfolgreiche Kooperation zu ermöglichen. Ich bekenne gerne und offen, daß den Akademiker hier eine erhebliche Bringschuld trifft, der Praktiker sollte aber auch seine Holschuld nicht ganz vergessen.

Im übrigen sollten die hier vorgetragenen Arbeitsergebnisse zeigen, wie in Zusammenarbeit zwischen Industrie und Hochschule durch eine zunächst eingehende systemtechnische Überlegung, sich dann aber daran anschließende gezielte Maßnahmen Energie einsparen und Qualität verbessern lassen. Ein nächster Schritt unserer Arbeiten wird sich der Interaktion zwischen Energieaufwand, Reststoffanfall und Produktqualität widmen und auch hier versuchen, jeweils ein Optimum zu finden.