

Die Hochtemperatur-Energietechnik aus thermodynamischer Sicht

ACHIM DITTMANN, DRESDEN UND MICHAEL BECKMANN, WEIMAR

1	Zusammenfassung	1
2	Aufgaben der Hochtemperatur-Energietechnik	2
3	Ingenieurwissenschaftliche Grundlagen	3
4	Beispiele der industriellen Anwendung	4
5	Symbolverzeichnis	13
6	Literatur	14

1 Zusammenfassung

Die Hochtemperatur-Energietechnik hat angetrieben von den Kräften der technisch-industriellen Entwicklung eine weit zurückreichende Tradition und als Ingenieurdisziplin ein festes wissenschaftliches Fundament. Die Thermodynamik stellt dabei wesentliche Grundlagen zur Verfügung. Die gegenwärtigen Entwicklungsaufgaben in der Hochtemperatur-Energietechnik, die kurz mit dem Stichwort *Ressourcenschonung* überschrieben werden können, sind interdisziplinärer Natur, sie umfassen die Energiebereitstellung bis hin zur Energieanwendung und schließen Fachdisziplinen der Verfahrenstechnik, Werkstofftechnik usw. mit ein.

In dem vorliegenden Beitrag wird zunächst ein Überblick über Aufgaben der Hochtemperatur-Energietechnik gegeben und nachfolgend anhand von Beispielen auf die Umsetzung in der Forschung und der Praxis eingegangen. Die hier gewählten Beispiele sollen einerseits die Breite der Aufgaben z.B. der Effizienzsteigerung, der Emissionsminderung und der Erhöhung der Verfügbarkeiten in den Bereichen der Energiebereitstellung/ Energieumwandlung und der Grundstoffindustrie verdeutlichen. Andererseits sollen die Beispiele auch Entwicklungstendenzen ansprechen. Die langfristige Sicherung der Energieversorgung ist eine wesentliche strategische Aufgabe. Fragen der Substitution von primären Energieträgern durch Ersatzbrennstoffe oder Biomassebrennstoffe sind sehr sorgfältig zu prüfen, d.h., zu bilanzieren. Darüber hinaus müssen alternative Brennstoffe, wie z.B. Wasserstoff, auch im Zusammenhang mit Prozessentwicklungen im Hochtemperaturbereich zu untersuchen. Zu erwarten ist dann ein "Wiederanschub" der experimentellen und theoretischen Arbeiten zum Plasmaverhalten.

2 Aufgaben der Hochtemperatur-Energietechnik

Die Hochtemperatur-Energietechnik umfasst ein breites Spektrum von Prozessen der Energiebereitstellung, Energieumwandlung und Energieanwendung. Eingeschlossen sind insbesondere Prozesse der Kraftwerkstechnik und der Grundstoffindustrie. Verallgemeinert stehen die Aufgaben unter der Überschrift der Ressourcenschonung. Hervorzuheben ist, dass diese Zielstellung – Ressourcenschonung heißt u.a. Optimierung von Prozessen – keineswegs neu sondern von je her das Bestreben ingenieurtechnischer Entwicklungen ist. Jedoch hat das Thema der Ressourcenschonung vor dem Hintergrund des globalen Wirtschaftswachstums und seiner Folgen eine hohe Dringlichkeit erfahren. Nachdem zunächst die Entwicklung von Technologien und Produkten, danach die Erhöhung der Produktionsleistung und der Qualität wesentliche, durch die Konsumenten ausgelöste Triebkräfte der wirtschaftlichen Entwicklung waren, gewinnen heute mehr und mehr die ökologischen Faktoren an Bedeutung, die insbesondere durch die Politik gesteuert werden.

Wesentliche Aspekte der Ressourcenschonung bestehen aus technischer Sicht u.a. in den weiteren, zunächst übergeordneten Zielstellungen der:

- Effizienzsteigerung und
- Schadstoffminderung

bei bestehenden Technologien sowie um die

- Entwicklung neuer Technologien, deren Realisierung u.U. a priori an Hochtemperaturprozesse gebunden ist.

Bei der Effizienzsteigerung geht es in erster Linie um die Verminderung von Verlusten, d.h., um die Annäherung an das thermodynamische Maximum bei der Energiebereitstellung und –umwandlung (Steigerung von Wirkungsgraden) und an das thermodynamische Minimum bei der Energieanwendung (Senkung des spezifischen Energiebedarfes). Die Effizienzsteigerung, die sich durch die Verbesserung von z.B. Produktqualitäten ergibt, sei an dieser Stelle mit erwähnt. Sie ist eine Aufgabe für die jeweiligen Fachgebiete der Verfahrenstechnik, Werkstofftechnik, usw. und stellt aus dieser Sicht wiederum entsprechende Anforderungen an den Energieeinsatz.

Selbstverständlich ist bereits mit der Effizienzsteigerung durch die Verminderung von Verlusten, d.h., bessere Energieausnutzung, eine spezifische Verminderung des Schadstoffausstoßes und damit eine entsprechende absolute Schadstoffminderung verbunden. Dennoch sei die Schadstoffminderung im Zusammenhang mit der Entwicklung von Primärmaßnahmen z.B. bei Verbrennungsprozessen oder der Entwicklung von CCS-Technologien als eine übergeordnete Zielstellung hervor gehoben.

Die Effizienzsteigerung und Schadstoffminderung schließen Teilaspekte wie die Erhöhung der Verfügbarkeit (z.B. Korrosionsminderung, HT-Bauteilbeanspruchung) an Anlagen (Einzelprozesse) oder Anlagenteilen gleichermaßen ein, wie übergeordnete Betrachtungen zum kumulierten Energieeinsatz, Nutzerverhalten usw. für ganze Verfahrensketten (Koppelprozesse) zeigen.

Unter der Überschrift *Entwicklung neuer Technologien* können sowohl die Aktivitäten in Bezug auf die Nutzung regenerativer Energieträger (Solar, Wind, Biomasse bis hin zur Fusion) als auch die Entwicklung neuer Herstellungsverfahren wie z.B. das Dünnbandgießen in der Stahlindustrie eingeordnet werden.

Die zuverlässige Sicherung von Energie ist neben der Wasserversorgung eine existentielle Aufgabe. Für die Hochtemperatur-Energietechnik ergeben sich große Chancen für den Klimaschutz und über den Technologietransfer auch für die Standortsicherung von Industrieunternehmen in Deutschland.

Betrachtet man nun Teilaufgaben, die mit den übergeordneten Zielen der Effizienzsteigerung und Schadstoffminderung zusammen hängen, so lassen sich diese zunächst grob in die Anwendungsbereiche der

- Brennstofftechnik
- Feuerungstechnik (Verbrennung, einschl. Pyrolyse, Vergasung)
- Dampferzeuger
- Industrieöfen
- Energieumwandlungsmaschinen

aufteilen. In den genannten Anwendungen spielen in unterschiedlichem Ausmaß Vorgänge eine Rolle, die in die Fachgebiete

- Stoff- und Wärmeübertragung und
- chemische Reaktionstechnik

einzuordnen sind.

3 Ingenieurwissenschaftliche Grundlagen

In dem hier gesteckten Rahmen seien einige wichtig erscheinende ingenieurtechnische Grundlagen, die die Thermodynamik für die v.g. Prozesse bereitstellt, genannt ohne diese zu vertiefen.

Fasst man unter der Thermodynamik die Gesetzmäßigkeiten, unter denen Energieumwandlungs- und Energieübertragungsvorgänge verlaufen zusammen, so sind neben

- den Erhaltungsgesetzen (Masse, Energie und Impuls) sowie
- der Entropie im weiteren Sinne u.a. auch
- die Transportgleichungen zur Stoff- und Wärmeübertragung
- und chemische Reaktionen

bei einer Betrachtung der Hochtemperatur-Energietechnik aus thermodynamischer Sicht mit eingeschlossen.

Erwähnt seien darüber hinaus Grundlagen zur

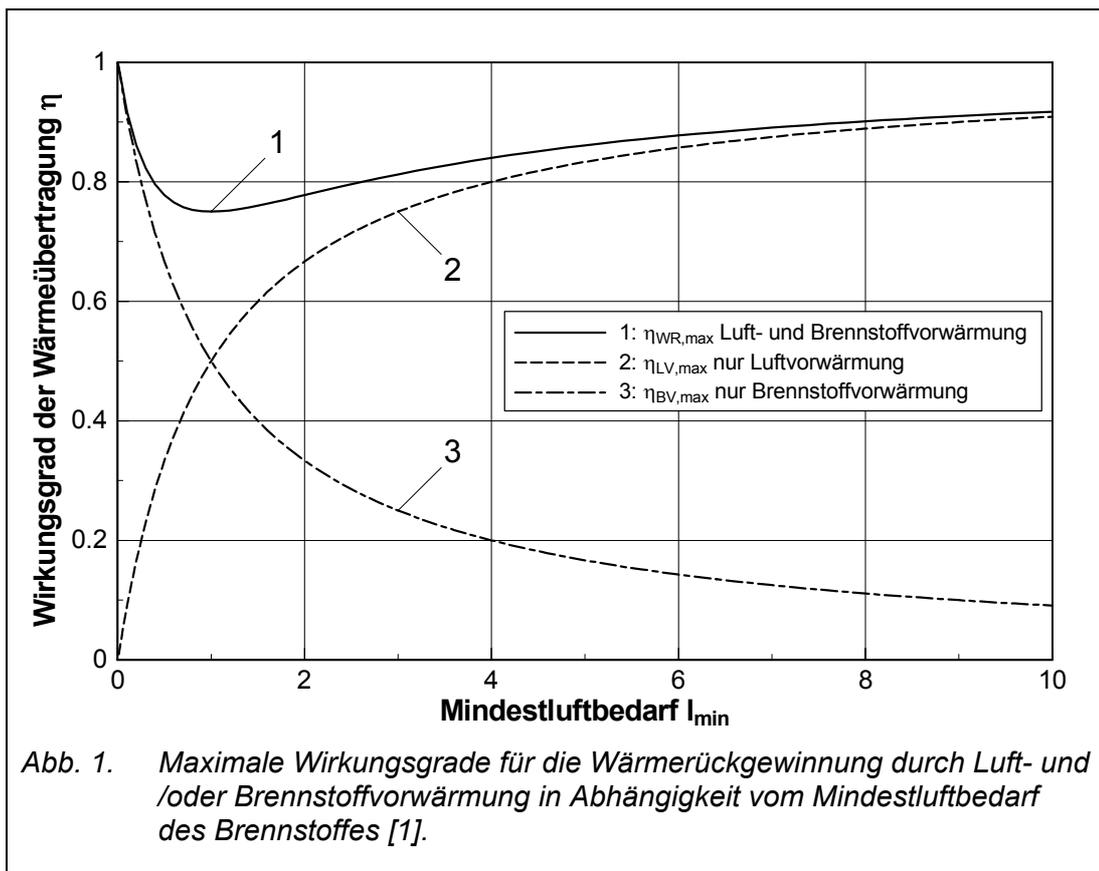
- Ermittlung von Stoffdaten,
- Hochtemperatur-Meßtechnik,
- .u.a.m.

4 Beispiele der industriellen Anwendung

Im Folgenden seien einige Beispiele aus den in Abschnitt 2 genannten Anwendungsgebieten der *Brennstofftechnik*, *Feuerungstechnik* (*Verbrennung*, *einschl. Pyrolyse*, *Vergasung*), *Dampferzeuger*, *Industrieöfen* und *Energieumwandlungsmaschinen* näher betrachtet:

Für den Einsatz fossiler Brennstoffe (Kohle, Erdöl, Erdgas usw.) bei industriellen Hochtemperaturverfahren, wie z. B. dem Brennen von Zementklinker, oder im Bereich der Energieumwandlung in Kraftwerksanlagen liegen umfangreiche Erfahrungen zur Optimierung der Prozessführung vor. Dabei konnten für die einzelnen Prozesse jeweils entsprechende **brennstofftechnische Kriterien** abgeleitet werden. Diese Kriterien beschreiben die Eigenschaften eines Brennstoffes aus brennstofftechnischer Sicht im Wesentlichen

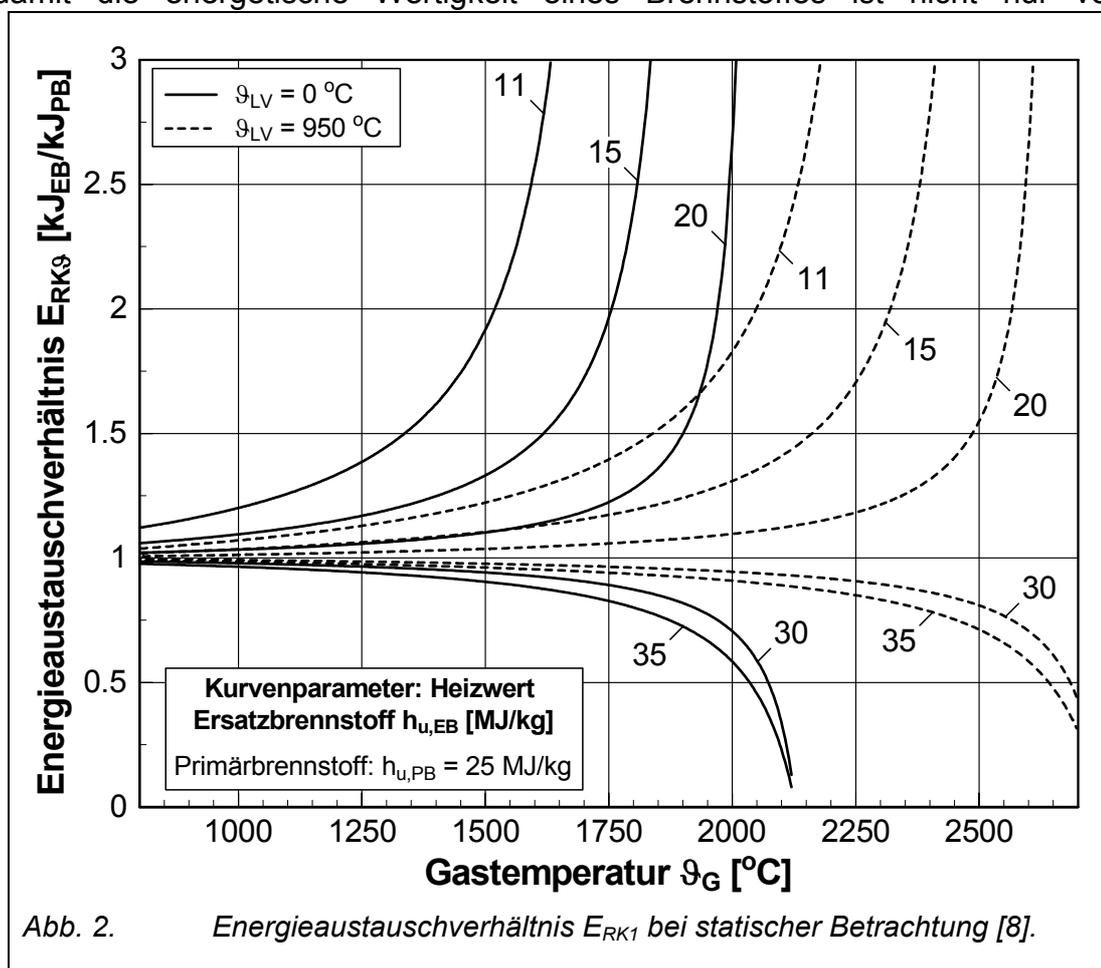
- chemisch,
- mechanisch,
- kalorisch und
- reaktionstechnisch.



Bereits anhand der Elementaranalyse von Brennstoffen lassen sich über die *Verbrennungsrechnung* Kenngrößen wie Mindestluftbedarf und spezifische Abgasmenge aber auch **Möglichkeiten der Wärmerückgewinnung** zur Brennstoff- und/oder Luftvorwärmung ermitteln. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass der Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung wesentlich durch den Mindestluftbedarf I_{min} und das jeweilige Luftüberschussverhältnis λ bestimmt wird. Abb. 1 zeigt die maximalen

Wirkungsgrade $\eta_{LV,max}$ und $\eta_{BV,max}$ in Abhängigkeit vom Mindestluftbedarf I_{min} . Eine Verbesserung der Wärmerückgewinnung $\eta_{WR,max}$ durch eine Brennstoffvorwärmung ergibt sich bei Brennstoffen mit niedrigem Mindestluftbedarf und damit in der Regel nur bei heizwertschwachen Brennstoffen. Hinzu kommt, dass bei abnehmendem Heizwert das Mindestluftbedarfverhältnis $I_{min,EB}/I_{min,PB}$ und das Mindestabgasmengenverhältnis $V_{min,EB}/V_{min,PB}$ nicht im gleichen Maße wie das Heizwertverhältnis $h_{u,EB}/h_{u,PB}$ abnehmen. Auf diese Besonderheiten im Zusammenhang mit der Wärmerückgewinnung muss bei Substitution heizwertreicher Primärbrennstoffe durch schwachkalorische Ersatzbrennstoffe geachtet werden.

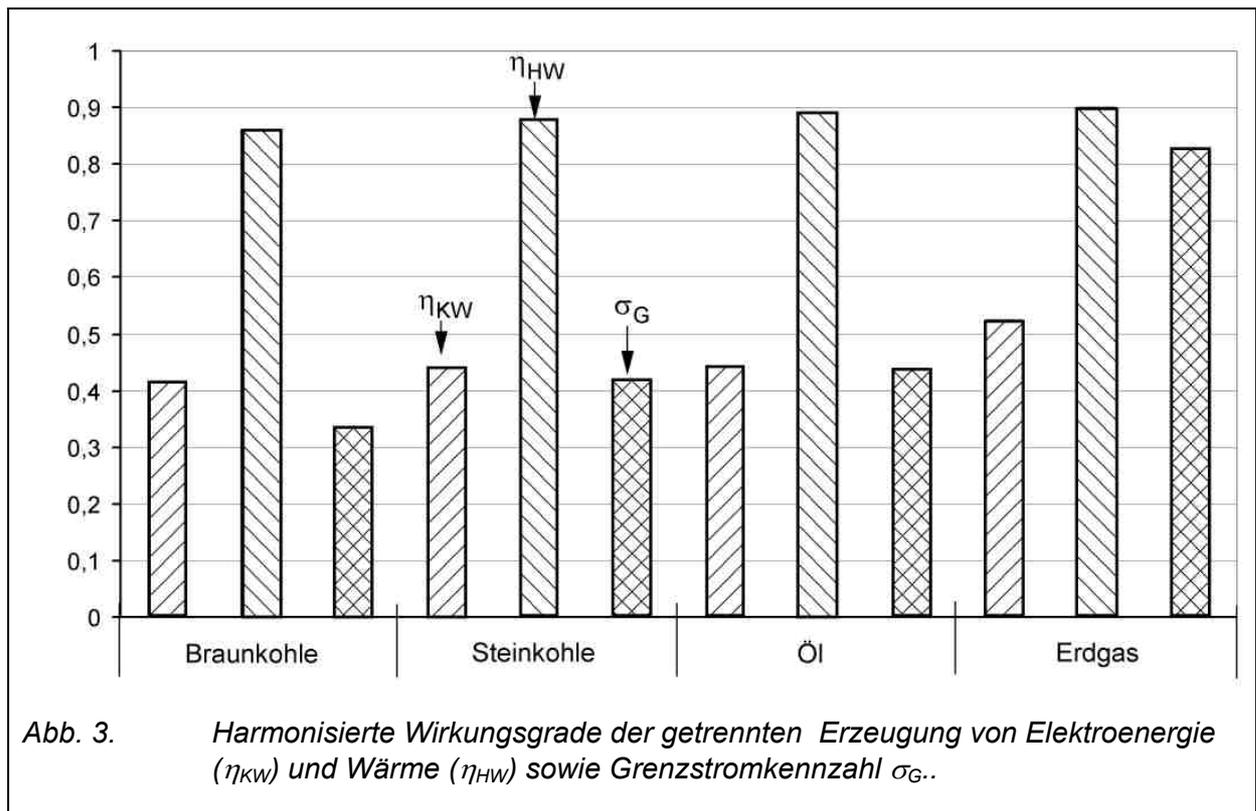
Ein großes Aufgabengebiet besteht derzeit in der Entwicklung von Charakterisierungsmethoden und der Ableitung von Einsatzkriterien für **Ersatzbrennstoffe**, einschließlich Biomassebrennstoffe. Die Beurteilung der brennstofftechnischen Eigenschaften von Ersatzbrennstoffen ist heute weitestgehend nur auf Grundlage von empirischen Ergebnissen möglich (z. B. [2] bis [7]). Kalorische Eigenschaften von Ersatzbrennstoffen können bereits jetzt mit Hilfe vereinfachter, für die Praxis jedoch tragfähiger, mathematischer Modelle zu den Wechselwirkungen der Haupteinflussgrößen deutlich gemacht werden [8]. So ergibt sich bei einem gedanklichen Vergleich eines Prozesses, der mit einem Ersatzbrennstoff mit $h_{u,EBI} = 20$ MJ/kg ohne Luftvorwärmung betrieben wurde, mit einem zweiten Prozess, der nun mit einem Ersatzbrennstoff mit nur $h_{u,EBII} = 15$ MJ/kg jedoch mit gleichzeitiger Luftvorwärmung betrieben wird, bei Prozesstemperaturen oberhalb von $\vartheta_G > 1600$ °C der Fall, dass der Ersatzbrennstoff EBII mit dem geringeren Heizwert „mehr Wert“ hat, als der höherkalorische Ersatzbrennstoff EBI (s. Abb. 2). D.h. das *Energieaustauschverhältnis* und damit die energetische Wertigkeit eines Brennstoffes ist nicht nur von den



brennstofftechnischen, insbesondere den kalorischen Eigenschaften abhängig, sondern kann wesentlich durch die **Prozessführung und die Optimierung**, z.B. durch verbesserte Wärmerückgewinnung, beeinflusst werden.

In der **Feuerungstechnik** werden Fragen zur Brennstoffumsetzung unter den Gesichtspunkten einer hohen Effizienz und der Schadstoffminderung durch den Prozess untersucht. So genannte **Primärmaßnahmen**, die jeweils spezifische Temperatur-, Konzentrations-, Verweilzeit- und Verweilzeitverteilungsverhältnisse vorsehen und stichpunktartig z.B. mit Maßnahmen wie Luftstufung, Brennstoffstufung, Rührkessel- und Kolbenstromcharakteristik verbunden sind, wurden in der Vergangenheit sehr umfangreich untersucht (z.B. [9] bis [13]). Gegenwärtig besteht in der Übertragung dieser Maßnahmen auf die so genannte Oxy-Fuel Technologie im Zusammenhang mit den **CCS-Technologien** ein großes Entwicklungspotenzial (z.B. [14]). Darin eingeschlossen sind aus feuerungstechnischer Sicht neben den Fragen zur Schadstoffbildung und -reduktion auch das veränderte Verschmutzungs- und Verschlackungsverhalten, das Korrosionsverhalten, Ausbrand, Säuretaupunkt und die Aschequalität. Die *Oxy-Fuel Technologie* stellt jedoch auch aus wärmetechnischer Sicht neue Herausforderungen an die Beschreibung der Wärmeübertragung in Dampferzeugern, die veränderte Flammen-, Gasstrahlung und Konvektion sind hier beispielhafte Stichworte.

Ein derzeit energiepolitisch heftig diskutiertes Problem sind die Fördermechanismen der **Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)**, da sie zum einen als eines der Hauptinstrumente der CO₂-Einsparung „erkannt“ worden ist aber zum anderen die nationalen Förderinstrumente mit dem bestehenden KWK-Gesetz 2010 auslaufen. Die Europäische Union hat dazu eine Richtlinie [15] erlassen, nach der nur so genannte hocheffiziente KWK-Anlagen gefördert werden sollen. Als hocheffizient werden solche bezeichnet, bei denen im Vergleich zu den Verfahrensketten der getrennten Bereitstellung von Elektroenergie im Kraftwerk (KW) bzw. der Wärme in Heizwerken, Kesselanlagen u. a. m. (HW) Brennstoffeinsparungen von mindestens 10 % erreicht werden. Mit Blick auf die reale Verringerung der CO₂-Emissionen ist jedoch zu erwarten, dass dieses Effizienzkriterium erhöht wird. Zur Effizienzbewertung werden nicht etwa Brennstoffnutzungsgrade bzw. Wirkungsgrade verwendet, wie sie dem jeweils nationalen Brennstoffmix entsprechen, sondern festgeschriebene „harmonisierte“ Wirkungsgradreferenzwerte verwendet. In Abb. 3 sind für die Primärenergieträger Braunkohle, Steinkohle, Öl und Gas die Wirkungsgradreferenzwerte nach [16] dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die „Bilanz schließenden Referenzkraftwerke“ einen durchaus modernen Stand verkörpern (z.B. für Erdgas $\eta_{kW} = 52,5\%$). Unterstellt man langfristig ein Effizienzkriterium mit Mindestbrennstoffeinsparungen von 15 %, dann lassen sich mit Energiebilanzen die Konsequenzen für die Gestaltung von KWK-Anlagen ableiten. Die wichtigste Größe für die energiewirtschaftliche Güte der KWK, die sog. Stromkennzahl σ_G (Verhältnis der elektrischen Leistung bzw. Arbeit zur Wärmeabgabe), ist gleichfalls in der Abb. 3 dargestellt. Daraus lässt sich – abgesehen vom Primärenergieträger Braunkohle – ableiten, dass sich daraus z. T. außerordentlich hohe technische Anforderungen ableiten, die von einer Reihe von KWK-Anlagen derzeit kaum erfüllbar sind (z. B. Blockheizkraftwerke, Gasturbinen mit Abhitzekeessel).



Zur Erreichung der beabsichtigten Beiträge der KWK zur Reduzierung der CO₂-Emissionen werden künftig Kraftwerksblöcke der Heizkraftwerke den Trend der Kondensationskraftwerke zu hohen Temperaturen folgen müssen.“

Wichtig erscheint bei der Beurteilung der Effizienz bestimmter Energieumwandlungsprozesse, einschließlich der Brennstoffaufbereitung, die **Untersuchung von Verfahrensketten**. Erst auf dieser Basis lässt sich entscheiden, welche Wirkung in einem übergeordneten Rahmen im gesamten Wirtschaftssystem erzielt werden. Auch bei diesen Fragen liefert die Thermodynamik methodisch die Grundlagen durch die Bilanzierung und die Ermittlung von Wirkungsgraden.

Bei der energetischen **Nutzung von Biomasse** wird häufig argumentiert, dass es egal ist, mit welchem Wirkungsgrad Biomasse in flüssigen Brennstoff (Ersatzbrennstoff für fossilen Brennstoff) umgewandelt wird, weil ja Biomasse „unerschöpflich“ nachwächst. Solange man jedoch fossile Primärenergieträger wie Öl oder z. B. Steinkohle benötigt und aus diesen mit einer höheren Umwandlungsrate flüssigen Brennstoff herstellen kann – im Vergleich zu Biomasse, Restmüll usw. – solange ist es aus energetischer Sicht besser, die Biomasse zu verbrennen, um elektrischen Strom zu erzeugen oder Wärme bereitzustellen, als zu flüssigem Brennstoff zu verarbeiten. Damit wird, wie in [17] gezeigt, CO₂ in entsprechendem Maße eingespart, weshalb (aus dieser Sicht) der Einsatz von Biomasse nicht CO₂ neutral ist. Die Forderung muss sein, die Biomasse so effektiv wie irgend möglich einzusetzen, um die fossilen CO₂-Emissionen soweit wie möglich zu senken. Dies heißt nun gerade nicht, die Entwicklung für die Erzeugung flüssiger Brennstoffe aus Biomasse einzustellen. Im Gegenteil, da die Umwandlung zu Biomasse noch nicht effektiv genug ist, muss noch mehr Forschungs- und Entwicklungstätigkeit erfolgen. Es muss das Ziel bei der Umwandlung von Biomasse in flüssigen Brennstoff sein, an die Höhe der Effizienz der Umwandlungsmöglichkeiten bei fossilen Brennstoffen heranzureichen. D.h. der Maßstab (*benchmark*), der sich aus der Bilanzierung ergibt, muss für die Biomasse der Entwicklungsstand bei fossilen Brennstoffen sein. Erst wenn dieser Maßstab (*benchmark*)

erreicht ist, macht eine flächendeckende Industrieproduktion von flüssigem Brennstoff aus Biomasse Sinn, zumindest was das technische Wirtschaften mit Energie bei der Versorgung ganzer Regionen (Volkswirtschaft) betrifft¹.

Wenn bei einem detaillierten Vergleich der fossil und regenerativ betriebenen Verfahrensketten letztere besser abschneiden sollten, so ist das kein Widerspruch zu den in dargestellten Beispielen, sondern als Ergebnis eben der Hinweis, mit dem gewählten Ersatz der Biomasse „richtig“ gehandelt zu haben.



Abb. 4. Beläge auf einer Membranverdampferwand.

Wenngleich die Nutzung von Biomasse zur Erzeugung von elektrischer Energie und/oder zur Bereitstellung von Wärme derzeit gegenüber der Erzeugung von flüssigen Brennstoffen aus energetischer Sicht derzeit Vorteile aufweist, so sollten die aktuellen **technischen Probleme von Biomassefeuerungen** nicht übersehen werden. Biomassebrennstoffe sind im Vergleich zu fossilen Brennstoffen als schwierige Brennstoffe einzustufen. Die Verbrennungsprodukte der in Biomasseverbrennungsanlagen eingesetzten Brennstoffe können zu besonders korrosionswirksamen und Wärmefluss verändernden Ablagerungen (Beläge) auf den Verdampfermembranwänden führen. Die

Beläge auf Wärmetauscherflächen stellen einerseits einen zusätzlichen Wärmeleitwiderstand dar, d.h. sie behindern die Wärmeauskopplung, und sie sind andererseits, wie Untersuchungen zeigen, als die wesentliche Ursache für die Korrosion von Dampferzeugerwerkstoffen anzusehen (z.B. [18]). Die deshalb periodisch durchzuführende Abreinigung der Beläge erfolgt derzeit größtenteils mechanisch während eines Anlagenstillstandes. Anlagenstillstände zur Reinigung der Dampferzeugerflächen und zur Reparatur der Korrosionsschäden sollten soweit wie möglich reduziert werden, da sie erheblich die Wirtschaftlichkeit der jeweiligen Biomasseverbrennungsanlage und auch durch An- und abfahren der Anlage mit fossilen Brennstoffen die CO₂-Bilanz beeinträchtigen. Eine Möglichkeit zur Verlängerung der Reisezeiten besteht neben der Optimierung der Prozessführung [19] auch in der **Online-Reinigung** [20] z.B. in den Strahlungszügen.

Durch die Bestimmung der **Wärmestromdichte auf Membranverdampferwände** [21] gelingt es, u.a. die Wirkung einer Online-Reinigung und den Aufbau von Belägen zu untersuchen. Wärmestromdichtemessung beruht auf der Ermittlung von Temperaturdifferenzen an der Abgas abgewandten Membranwandseite (zwischen Scheitel- und Stegtemperatur). Damit können für den Wärmefluss repräsentative Signale erhalten werden. *Abb. 5* stellt als Beispiel das Messsignal einer

¹ Sollte es nicht möglich sein, diesen Maßstab zu erreichen, weil grundsätzlich physikalische, chemische und thermodynamische Gründe dagegen sprechen, müsste der Vergleich an einer mit den vorgenannten Restriktionen begründeten maximal erreichbaren Entwicklungshöhe gemessen werden, um die Ausschöpfung von Potentialen darzulegen. Schließlich wird die Notwendigkeit der Nutzung von Biomasse zur Substitution von fossiler Energie nicht in Frage gestellt. Ziel muss sein, auch mit regenerativer Energie möglichst effizient umzugehen.

Wärmestromdichtemessung an einer Membranverdampferwand dar. Die Abb. 5 a) und b) zeigen deutlich die Auswirkung der Online-Reinigung auf das Messsignal einer Messstelle, die im Bereich des Feuerraumes installiert ist. Mit dem Reinigungszyklus steigen die Messsignale abrupt und simultan an. Nach den Reinigungen nehmen die Messsignale wieder ab, was auf ein Anwachsen eines Belages auf der Membranverdampferwand schließen lässt. Hierbei ist zu erkennen, dass das Signal der Wärmestromdichtemessung kurz nach der Reinigung relativ stark und im weiteren Verlauf zunehmend flacher abfällt. Anhand der Messwerte lassen sich unter Berücksichtigung der Auswirkungen der Online-Reinigung auf Wasserverbrauch, Temperatur, Feuchte und Abgasmassenströme im Kessel usw. u.a. geeignete Zeitpunkte zur Reinigung ermitteln.

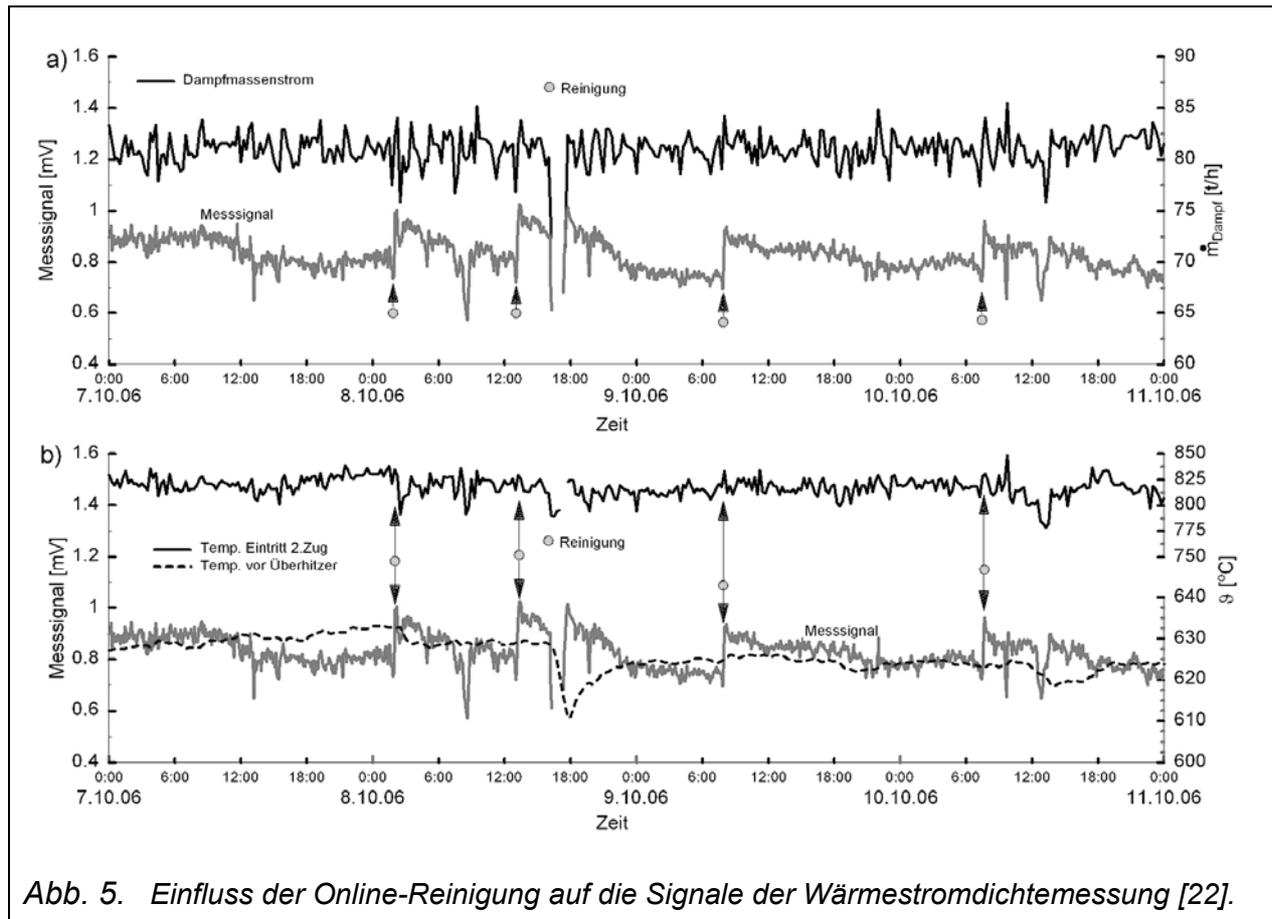


Abb. 5. Einfluss der Online-Reinigung auf die Signale der Wärmestromdichtemessung [22].

Das kürzlich erschienene Positionspapier Energieversorgung der Zukunft – Beitrag der Chemie – belegt in eindrucksvoller Weise, die Komplexität, die bei Verfahren zur Energiebereitstellung und Nutzung sowie bei der Herstellung von Produkten besteht [23]. Hochtemperatur-Energietechnik ist nicht nur auf die Prozesse in Verbindung mit der Energieumwandlung und –bereitstellung beschränkt sondern durchdringt, wie eingangs erwähnt, in vielfältiger Weise die **Prozesse der Grundstoffindustrie** und der **chemischen Industrie**. In dem hier gesteckten Rahmen kann darauf jedoch ebenfalls nur beispielhaft eingegangen werden.

Ein sehr enges Bindeglied zwischen der Energie- und Stoffwirtschaft stellt die **Wasserstoffherstellung** dar. Für einen weit in die Zukunft reichenden Horizont sind nach Auffassung der Autoren derzeit zwei grundsätzliche Wege denkbar. Zum einen ist dies die Nutzung von Biomassen und deren Wandlung zu Wasserstoff über die Reformierung bzw. auf bakteriellem Wege. Hier ist schon auf Grund der Konkurrenz zur energetischen

Nutzung der Biomasse bzw. der Herstellung von Biodiesel nur ein geringer Beitrag zu erwarten. Die zweite und nahezu unerschöpfliche Quelle stellt das Wasser selbst dar. Die Elektrolyse ist eine erprobte Technologie, setzt aber den Einsatz von Elektroenergie voraus. Die Nutzung von Kraftwerken auf der Basis regenerativer Energiequellen (Wasser, Wind) ist zwar denkbar, aber andererseits kontraproduktiv, da der Einsatz des Wasserstoffs zu großen Teilen wieder in Kraftwerken zur Stromerzeugung dient. Inwieweit die Photokatalyse zu einer großtechnischen Reife mit akzeptablen Marktchancen entwickelt werden kann, lässt sich derzeit nicht absehen. Der Weg über die **thermische Dissoziation** des Wassers ist bislang nur wenig begangen, jedoch könnten sich mit der Entwicklung der Hochtemperaturreakorteknik langfristig Chancen ergeben. In der *Abb. 6* sind Ergebnisse des Umsatzes bei thermodynamischem Gleichgewicht dargestellt. Es ist zu erkennen, dass beim Standarddruck ($p_0 = 103,325 \text{ kPa}$) erst ein nennenswerter Umsatz bei Temperaturen von 3000 bis 3500°C auftritt. Durch Reduzierung des Prozessdruckes (im Bild für $p = 50 \text{ Pa}$) lässt sich ein relativ hoher Umsatz bei deutlich niedrigerer Temperatur erzielen. Die Entwicklung dieser Technologie würde demnach eine wirtschaftliche Kombination von Hochtemperatur- und Vakuumtechnik voraussetzen.

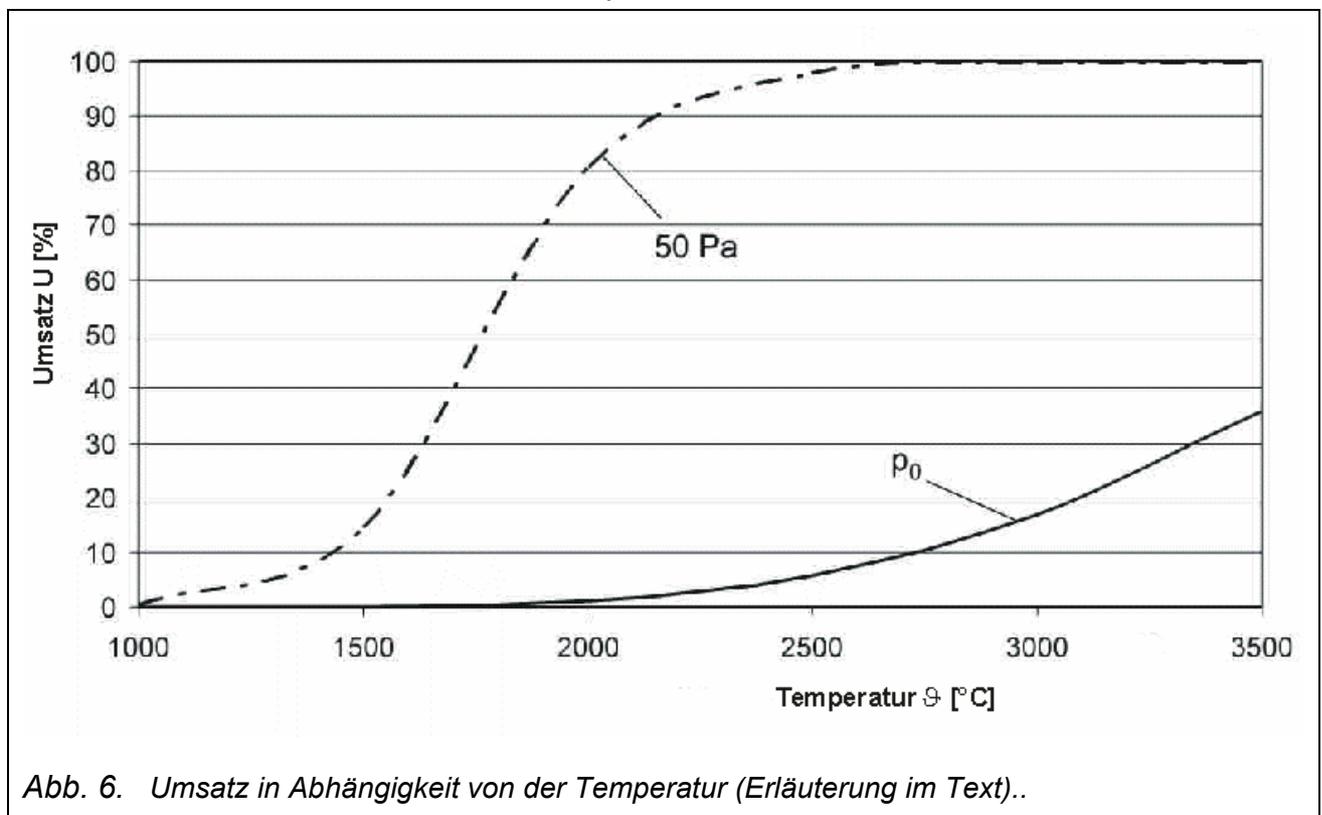
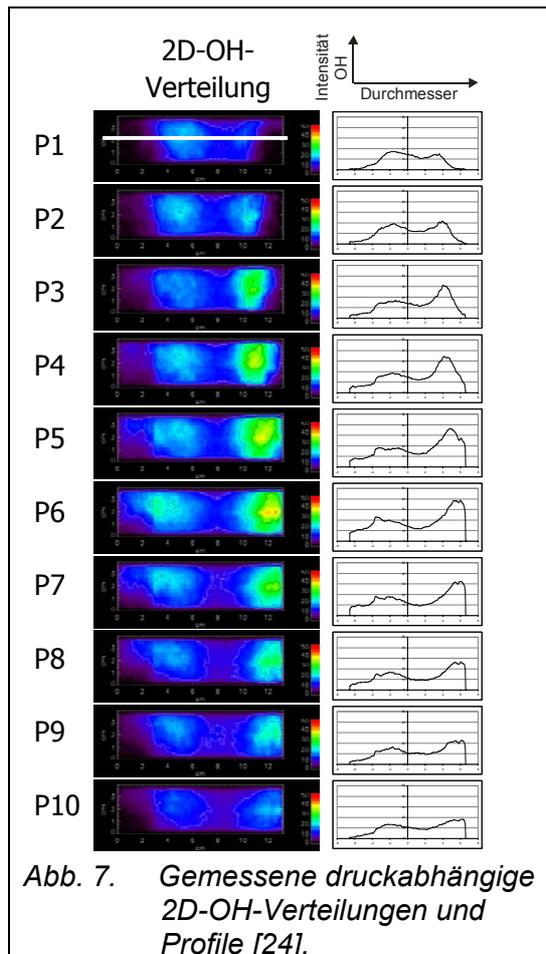


Abb. 6. Umsatz in Abhängigkeit von der Temperatur (Erläuterung im Text)..

Als ein weiteres Beispiel sei ein Verbrennungsprozess in einem Pulsationsreaktor (PR, siehe auch Schmidt-Rohr) betrachtet. Dabei handelt es sich um eine Gleichraumverbrennung bei der die Energiefreisetzung mit einer selbst erregten periodisch wiederholten Schwingung der Zustandsgrößen (Druck, Temperatur, Geschwindigkeit) überlagert ist (auch so genannte pulsierende Verbrennung). Unter bestimmten Randbedingungen wird durch den Verbrennungsprozess die akustische Eigenfrequenz des Brennraumes angeregt. Die so entstehenden Druckschwingungen erzeugen eine periodische Luft- bzw. Brennstoff/Luft-Zufuhr in den Brennraum, was zu einer periodischen so genannten selbsttätigen pulsierenden Verbrennung führt. Unterschiede der pulsierenden Verbrennung im Vergleich zu stationären Gleichdruck-Verbrennungsprozessen sind im Wesentlichen eine höhere Brennraumbelastung, die

Intensivierung des konvektiven und diffusiven Stoff- und Wärmetransportes, der Ablauf eines selbst ansaugenden Verbrennungsprozesses (teilweise Umwandlung der Brennstoffenergie in Arbeit), jedoch auch eine höhere Lärmbelastung und ein erhöhter Verschleiß durch stärkere Materialbeanspruchung. Die Erhöhung des konvektiven Wärme- und Stofftransportes wird hierbei durch eine gesteigerte Turbulenz sowie den diffusiven Wärme- und Stofftransporten durch eine verringerte Grenzschichtdicke bzw. einen periodischen Auf- und Abbau der Grenzschicht infolge einer mit der Druckschwingung einhergehenden Schwingung der Gasgeschwindigkeit hervorgerufen.



In einem Pulsationsreaktor aus Quarzglas mit Helmholtz-Resonator-Form und vertikaler Strömungsrichtung wurden zweidimensionale Laserinduzierte Fluoreszenzmessungen (2D-LIF) durchgeführt [24]. Die in der Schnittebene angeregte Fluoreszenz wurde senkrecht dazu mit Hilfe einer intensivierten CCD-Kamera registriert. Die zweidimensionale druckabhängige Aufzeichnung der OH-Konzentration (Beispiel Abb. 7) liefert Aussagen über die Zündposition, den Zündzeitpunkt sowie die Flammenausbreitung und kann zur weiteren Berechnung der Temperaturverteilung in der Messebene herangezogen werden. Diese Art von Grundlagenuntersuchungen sind wichtig für das Verständnis der komplexen Zusammenhänge zwischen Akustik, chemischer Reaktionskinetik des Verbrennungsprozesses und Strömungsvorgängen, die wiederum Einfluss auf die Wärme- und Stoffübertragungsbedingungen, die Betriebsweise (Druckamplitude und Frequenz) sowie auf die Stabilität der pulsierenden Verbrennung ausüben.

Es sei an dieser Stelle der Hinweis erlaubt, dass es jeweils von dem gestellten Problem abhängt, in welchem Detaillierungsgrad experimentelle Untersuchungen und mathematische

Modellierungen erforderlich und sinnvoll sind. Nicht immer sind Untersuchungen im Mikromaßstab wie in dem voran stehenden Beispiel oder CFD- Analysen notwendig, häufig lassen sich bereits durch grundlegende wärme- und reaktionstechnische Überlegungen, die nur die wesentlichen Einflussgrößen berücksichtigen, für die Praxis taugliche Modelle ableiten.

Das Beispiel in Abb. 8 zeigt des Bilanzschema eines Klinkerbrennprozesses [25]. Mit Hilfe einfacher Massen- und Energiebilanzen und unter Berücksichtigung der Transportgesetze gelingt es, die wesentlichen Einflüsse der Prozessführung, wie z.B.:

- Brennstoffaufteilung (Primär-, Sekundär-, Calcinatorfeuerung),
- Vorwärmtemperaturen (Luft, Schwachgas),

- Wärmerückgewinnung

zu untersuchen. Wichtig ist insbesondere im Zusammenhang mit Energieeinsparungsmaßnahmen und auch im Hinblick auf die Freisetzung von so genannten Klimagasen (insbesondere CO_2), das thermodynamische Mindestmaß (benchmark) zu ermitteln und daran den jeweiligen Prozess zu messen. Insbesondere bei der CO_2 -Diskussion ist zu unterscheiden, welche CO_2 -Ströme stoffbedingt (im Klinkerbrennprozess z.B. durch die Entsäuerung von Kalkstein) und welche durch die Energieumwandlung von Brennstoffen entstehen. Die Optimierung eines Prozesses im Hinblick auf die CO_2 -Minderung und die Festlegung von CO_2 -Zertifikaten muss sich daher an dem jeweiligen thermodynamischen Minimum orientieren, andernfalls wären Produktionseinschränkungen die Folge.

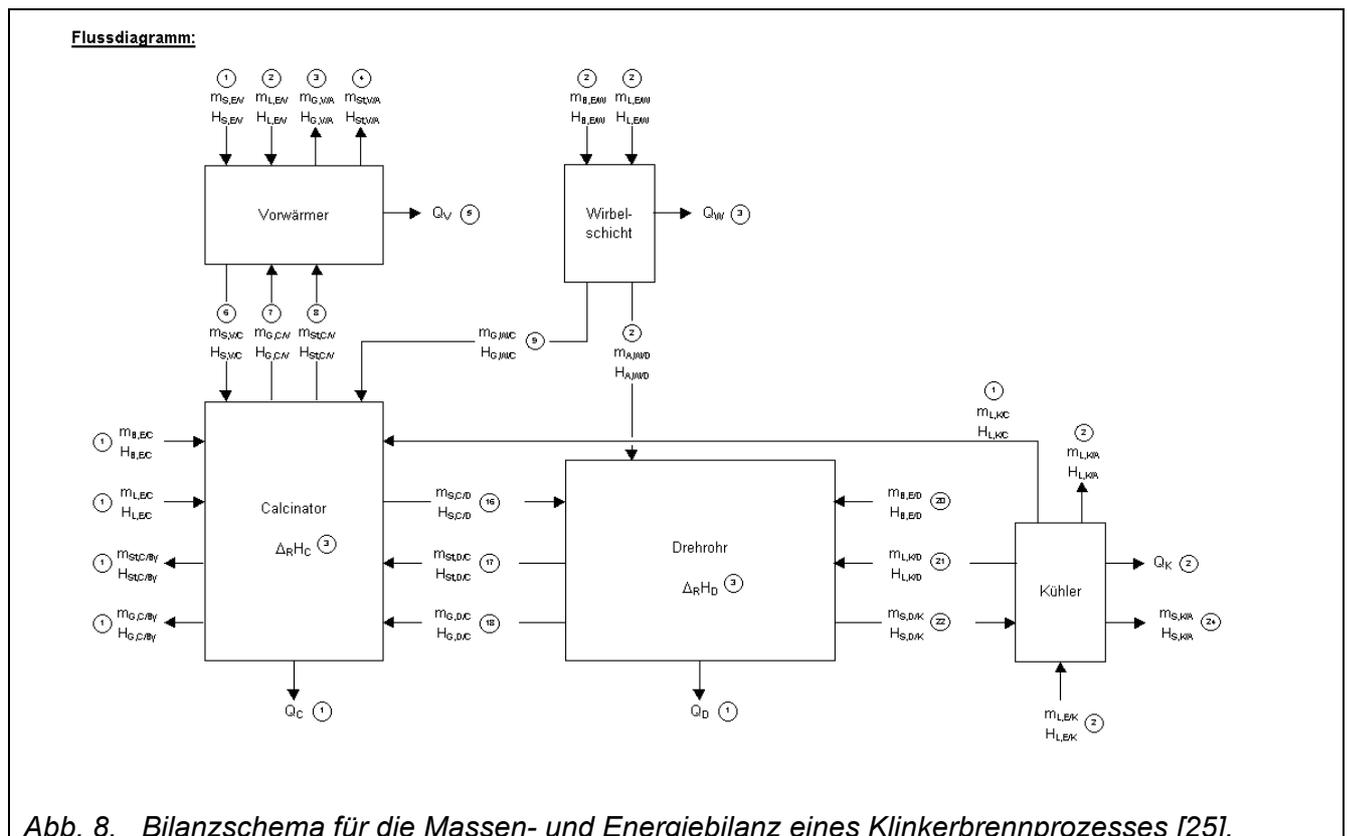
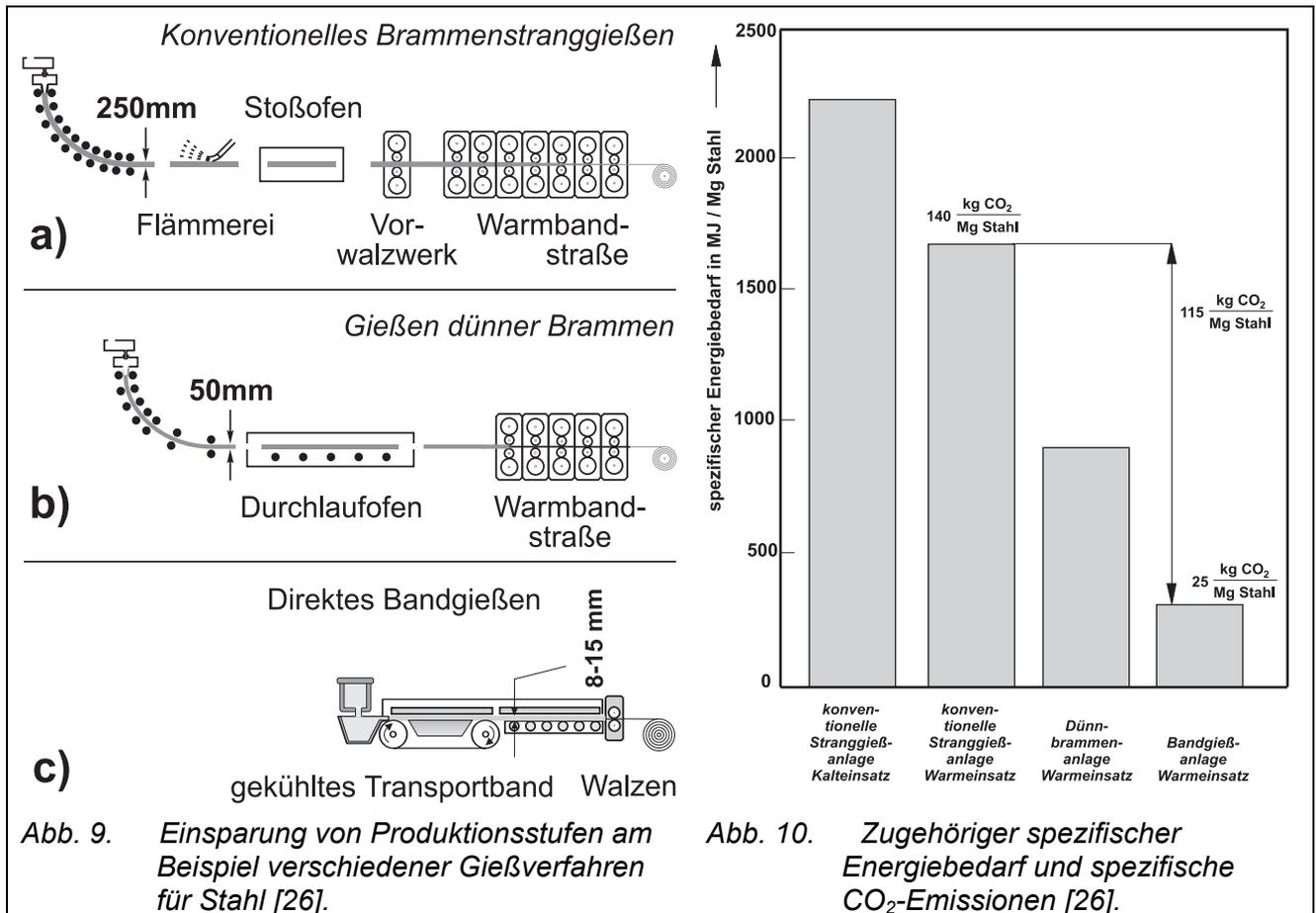


Abb. 8. Bilanzschema für die Massen- und Energiebilanz eines Klinkerbrennprozesses [25].

Aufgabe der Hochtemperaturenergetechnik ist es daher auch, Prozesse so weiter zu entwickeln, dass sie dem thermodynamischen Minimum angenähert werden. Ein eindrucksvolles Beispiel ist die Entwicklung in der Stahlindustrie vom Brammengießen hin zum direkten Bandgießen (Abb. 9) (z.B. [26] bis [28]). In dieser Entwicklung stecken eine Vielzahl von Detailschritten und Problemen, wie z.B. die Wärmeübertragung oberhalb des Leidenfrost-Punktes bzw. dessen Unterdrückung für Wärmestromdichten oberhalb von 1 MW/m^2 , die Möglichkeit der Einstellung der Erstarrungsgeschwindigkeit des aufgelegten erstarrenden (Flüssigkeit) Bandes von der Unterseite über die zuvor genannte Intensivkühlung und der Intensivierung des Strahlungswärmeübergangs von oben sowie die Synchronisierung der Fluidgeschwindigkeit mit der Transportbandgeschwindigkeit. Die Abb. 10 zeigt, in welchem Maße durch die Entwicklung der spezifische Energiebedarf und die spezifischen CO_2 -Emissionen abgesenkt werden.



5 Symbolverzeichnis

Symbole

Δ	Differenz	H	Enthalpie
η	Wirkungsgrad	h	spezifische Enthalpie
ϑ	Temperatur	l	spezifischer Luftbedarf
λ	Luftzahl	m	Masse
σ	Stromkennzahl	Q	Wärme
		v	spezifisches Abgasvolumen
E	Energieaustauschverhältnis		

Indices hochgestellt

. Strom

Indices tiefgestellt

BV Brennstoffvorwärmung

$Dampf$ Dampf

<i>EB</i>	Ersatzbrennstoff	<i>min</i>	Minimum
<i>G</i>	Gas	<i>RK1</i>	Rührkessel-Element 1
<i>G</i>	Grenz- (in Verbindung mit σ)	<i>u</i>	unterer (Heizwert)
<i>HW</i>	Heizwerk	<i>PB</i>	Primärbrennstoff
<i>KW</i>	Kraftwerk	<i>WR</i>	Wärmerückgewinnung (Luft- und Brennstoffvorwärmun)
<i>KWK</i>	Kraft-Wärme-Kopplung		
<i>LV</i>	Luftvorwärmung		
<i>max</i>	Maximum		

6 Literatur

- [1] Specht, E.; Jeschar, R.: Beurteilung von Industrieöfen bei Wärmerückgewinnung. Seminar zu Methoden der Energieeinsparung bei Industrieöfen, TU Clausthal, Institut für Energieverfahrenstechnik, 1990.
- [2] Beckmann, M.; Horeni, M.; Scholz, R.; Rüppel, F.: Notwendigkeit der Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen. Erschienen in: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 3- Immissions- und Gewässerschutz, Qualitätssicherung, Logistik und Verwertung, Deponierung der Schwerfraktion. TK-Verlag Thomé-Kozmiensky, Dez. 2003. ISBN 3-935317-15-8, S.213-230.
- [3] Weber, R.: Characterization of alternative fuels. Erschienen in: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: Optimierung der Abfallverbrennung 2. TK Verlag Karl-Thomé-Kozmiensky, 2005. ISBN 3-935317-19-0, S. 699 -708.
- [4] Eckardt, S.: Anforderungen an die Aufbereitung von Siedlungs- und Produktionsabfällen zu Ersatzbrennstoffen für die thermische Nutzung in Kraftwerken und industriellen Feuerungsanlagen. Schriftenreihe des Instituts für Abfallwirtschaft und Altlasten der Technischen Universität Dresden. Beiträge zu Abfallwirtschaft/Altlasten, Bd. 41, 2005. ISBN 3-934253-34-2.
- [5] Schirmer, M.; Bilitewski, B.; Rotter, S.: Characteristics of Chlorine in MSW and RDF – Species, Sampling and Analytical Methods. 24th International Conference on Incineration and Thermal Treatment Technologies. IT 3 Conference 9 – 13.05.2005, Galveston, Texas, USA.
- [6] Flamme, S.: Qualitätssicherung in Aufbereitungsanlagen zur Herstellung von Ersatzbrennstoffen. Erschienen in Thomé-Kozmiensky, K.-J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall – Band 2. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007, ISBN 978-3-93-5317-26-9. S.431 – 438. Tagung Berlin 31.01. – 01.02.2007.
- [7] Thiel, S.: Mitverbrennung von Ersatzbrennstoffen aus der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung in Kohlekraftwerken. Dissertation, 2007. Veröffentlichung demnächst.
- [8] Beckmann, M.; Scholz, R.: Energetische Bewertung der Substitution von Brennstoffen durch Ersatzbrennstoffe bei Hochtemperaturprozessen zur Stoffbehandlung. Teil 1: ZKG International 52 (1999) Heft 6, S. 287 - 303. Teil 2: ZKG International 52 (1999) Heft 8, S. 411 - 419.

- [9] Klöppner, G.: Zur Kinetik der NO-Bildungsmechanismen in verschiedenen Reaktortypen am Beispiel der technischen Feuerung. Dissertation, TU Clausthal, 1991.
- [10] Kolb, T.; Sybon, G.; Leuckel, W.: Reduzierung der NO_x-Bildung aus brennstoffgebundenem Stickstoff durch gestufte Verbrennungsführung. 4. TECFLAM- Seminar, Oktober 1990, Heidelberg, 1990.
- [11] Kremer, H.; Schulz, W.: Reduzierung der NO_x-Emissionen von Kohlenstaubflammen durch Stufenverbrennung. VDI-Berichte Nr. 574, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1985.
- [12] Levenspiel, O.: Chemical Reaction Engineering. John Wiley and Sons. New York, 1972.
- [13] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. B.G. Teubner, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden. 2001. ISBN 3-519-00402-X.
- [14] Tagungsband 38. Kraftwerkstechnisches Kolloquium, 24./25. Oktober 2006 Dresden. ISBN-10: 3-00-019841-5/ ISBN-13: 978-3-00-019841-0.
- [15] EU-Richtlinie 2004/8/EG veröffentlicht im Amtsblatt der Europäischen Union vom 21.02.04.
- [16] Entscheidung der Kommission zur Festlegung harmonisierter Wirkungsgrad-Referenzwerte. Veröffentlicht im Amtsblatt der Europäischen Union vom 06.02.07.
- [17] Scholz, R.; Beckmann, M.; Horeni, M.: Energetische Bewertung von Konzepten zur Substitution von fossilen Brennstoffen. Erschienen in: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 3. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2006, ISBN 3-935317-21-2. S. 509 – 535. Tagung Berlin 20. – 22. März 2006.
- [18] Spiegel, W.; Herzog, T.; Jordan, R.; Magel, G; Müller, W.; Schmidl, W.: Korrosion durch Einsatz von Biomasse- Ersatzbrennstoffen: Bedarf für belagsgestützte Korrosionskenngrößen. Erschienen in Thomé-Kozmiensky, K.-J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall – Band 2. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007, ISBN 978-3-93-5317-26-9. S.585 – 602. Tagung Berlin 31.01. – 01.02.2007.
- [19] Beckmann, M.; Spiegel, W.: Optimierung von Abfallverbrennungsanlagen. Erschienen in: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 3. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2006, ISBN 3-935317-21-2. S. 209 – 264. Tagung Berlin 20. – 22. März 2006.
- [20] Vodegel, S.; Harpeng, J.: Online-Kesselreinigung in Müllverbrennungsanlagen – Systeme und Belagseigenschaften–. Optimierung der Abfallverbrennung 2, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2005, ISBN: 3-935317-19-0.
- [21] Beckmann, M.; Krüger, S.; Spiegel, W.: Charakterisierung und messtechnische Erfassung von betriebsspezifischen Wärmewiderständen an Membranverdampferwänden in Abfall- und Biomasseverbrennungsanlagen. erschienen in: Born, M. (Hrsg.) Dampferzeugerkorrosion. Verlag: SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH. SIDAF-Tagung Freiberg, 27. – 28.10.2005. ISBN: 3-934409-27-X. S. 273 – 288.

- [22] Beckmann, M.; Krüger, S.; Spiegel, W.; Magel, G.: Online-Reinigung von Membranwänden in Abhängigkeit der Wärmestromdichte. Beitrag zum 23. Deutschen Flammentag. demnächst.
- [23] Positionspapier „Energieversorgung der Zukunft – der Beitrag der Chemie – DECHEMA, GDCh, DBG, DGMK, VDI-GVC, VCI. März 2007.
- [24] Großgebauer, S.; Beckmann, M.; Müller, D.; Wagner, V.; Burkert, A.; Triebel, W.; Stafast, H.: Zweidimensionale Konzentrations- und Temperaturmessungen in einem technisch relevanten Pulsationsreaktor mittels OH-LIF. Beitrag zum 23. Deutschen Flammentag. demnächst.
- [25] Beckmann, M.; Horeni, M.; Scholz, R.; Harnaut, T.: Einfluss der Prozessführung auf den spezifischen Energieverbrauch in Verfahren der Grundstoffindustrie beim Einsatz von Ersatzbrennstoffen. VDI Berichte 1708: „Ersatzbrennstoffe in der Energietechnik“, Tagung: Dortmund, 18. und 19. Juni, 2002, ISBN 3-18-091708-3, ISSN 0083-5560, S. 131-163.
- [26] Spitzer, K.-H.; Scholz, R.; Kroos, J.; Hower, K.H.; Nyström, R.; Burström, E.; Reichelt, W.; Dubke, M.: Entwicklungsstand beim DSC-Bandgießverfahren. stahl und eisen, 121 (2001) Nr. 5, S. 73 – 80.
- [27] Spitzer, K.-H.; Rüppel, F.; Viscorova, R.; Scholz, R.; Kroos, J.; Flaxa, V. Direct Strip Casting (DSC) – an Option for the Production of New Steel Grades. steel research 74 (2003) No. 11/12, S. 724 – 731.
- [28] Rüppel, F.; Spitzer, K.-H.; Scholz, R.; Kroos, J.; Flaxa, V.: Potentials of the Direct Strip Casting (DSC) process with regard to new materials and efficient energy use Euromat 2003, Federation of European Materials Societies, European Congress on Advanced Materials and Processes, 01. - 05. September 2003, Lausanne, Schweiz.