



Beckmann, M.; Unz, S.; Hack, N.: Möglichkeiten zur Energieeinsparung in der Grundstoffindustrie durch Hochtemperaturwärmeübertragung. In: Internationales ECEMP-Kolloquium am 24. und 25. Oktober 2013 in Dresden.

## **Möglichkeiten zur Energieeinsparung in der Grundstoff- industrie durch Hochtemperaturwärmeübertragung**

**Michael Beckmann, Simon Unz, Nina Hack**

**TU Dresden, Institut für Energietechnik,**

**Professur Verbrennung, Wärme- und Stoffübertragung**

## **INHALTSVERZEICHNIS**

INHALTSVERZEICHNIS .....	2
1 HOCHTEMPERATUR-WÄRMEÜBERTRAGUNG IN DER GRUNDSTOFF-INDUSTRIE.....	3
2 BEWERTUNG VON MASSNAHMEN ZUR ENERGIEEINSPARUNG BEI INDUSTRIELLEN PROZESSEN .....	5
2.1 Energieaustauschverhältnis .....	5
2.1.1 Bewertung von Effekten zur Effizienzsteigerung durch eine Brennstoffsubstitution.....	5
2.1.2 Auswirkungen von Effizienzsteigerungsmaßnahmen durch eine geänderte Prozessführung .....	7
3 PROZESSE DER GRUNDSTOFFINDUSTRIE.....	9
3.1 Klinkerbrennprozess.....	9
3.2 Produktionsprozesse in der Stahlindustrie .....	12
3.2.1 Beispiel Dünnbandgießen .....	13
3.2.2 Beispiel Koksloser Kupolofen .....	15
3.2.3 Hochtemperaturwärmeübertragung.....	19
4 ZUSAMMENFASSUNG .....	21
5 DANKSAGUNG .....	22
6 LITERATUR .....	22

## **ABSTRACT**

Steigende Preise für Brennstoffe und allgemeine Bestrebungen zu höherer Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit führen in der Grundstoffindustrie, ebenso wie in allen anderen Bereichen der Wirtschaft, zu verstärkten Anstrengungen bei der Prozessoptimierung. Möglichkeiten zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von beheizten Prozessen bieten zum einen die Substitution des Regelbrennstoffs durch einen preiswerten Brennstoff bzw. zum anderen die technologische Optimierung des Prozesses, z.B. durch Einsatz von Hochtemperaturwärmeverschiebesystemen auf Basis keramischer Werkstoffe zur Abwärmenutzung. Diese meist auf Teilprozesse bezogenen Maßnahmen können jedoch den Gesamtprozess u. U. stark beeinflussen. Eine vorherige Überprüfung der Optimierungseffekte kann durch eine Massen- und Energiebilanzierung erfolgen. Wesentliche Aussagen zum Effekt von Optimierungsmaßnahmen für Prozesse in der Grundstoffindustrie können z.B. durch das sogenannte Energieaustauschverhältnis getroffen werden. Eine Möglichkeit zur apparativen Umsetzung der Optimierungsmaßnahmen bei Hochtemperaturprozessen stellen Wärmeübertrager auf Basis keramischer Wärmerohre dar, die eine ausreichende Beständigkeit gegenüber den prozessbedingten Belastungen versprechen.

## **1 HOCHTEMPERATUR-WÄRMEÜBERTRAGUNG IN DER GRUNDSTOFFINDUSTRIE**

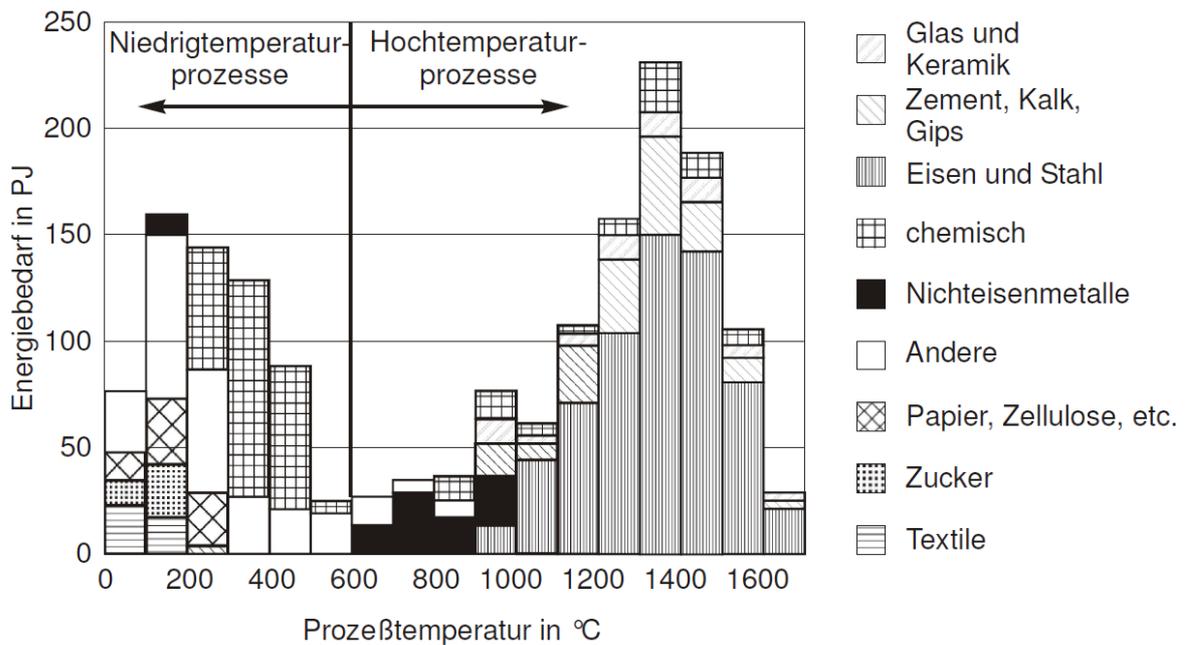
Steigende Energiepreise und strenge Anforderungen an die Emissionen erfordern in der Grundstoffindustrie, ebenso wie in anderen Bereichen der produzierenden Industrie, Anstrengungen zur Steigerung der Effizienz von Teil- und Gesamtprozessen. Dem zunehmenden Preisdruck, dem energieintensive Prozesse ausgesetzt sind, kann zum einen durch Energieeinsparung, durch die Nutzung von Abwärmeströmen aber auch durch den Einsatz von Substitutionsbrennstoffen begegnet werden.

Durch die Nutzung der Energieströme aus Abwärme im Prozess können Stoffströme, wie z.B. die Verbrennungsluft oder auch der Brennstoff vorgewärmt werden, wodurch deutliche Effizienzsteigerungen realisiert werden können. Als sehr vielversprechend wird die Nutzung von Energieströmen auf möglichst hohem Temperaturniveau durch den Einsatz von Hochtemperaturwärmeübertragern<sup>1</sup> eingeschätzt. Anwendungsfelder für Wärmeübertrager für den Einsatz bei Temperaturen über 600 °C sind, wie in Abbildung 1-1 dargestellt, in den Bereichen der Schwer- und Grundstoffindustrie zu finden. Dies umfasst

---

<sup>1</sup> Hochtemperaturwärmeübertrager: Wärmetechnischer Apparat, welcher bei verschiedenen Durchströmungsarten Wärmeströme auf hohem Temperaturniveau von einem heißen an einen kälteren Stoffstrom überträgt.

Produktionsprozesse insbesondere in der metall erzeugenden Industrie aber auch in der Glas-, Chemie- und Zementindustrie. Hierbei stellt die Nutzung von Hochtemperaturabwärmeströmen zur Prozesswärmeauskopplung und Wärmerückgewinnung auf hohem Temperaturniveau durch effiziente Wärmeverschiebesysteme eine interessante und potenziell effektive Möglichkeit zur Effizienzsteigerung und damit zur Reduzierung des Brennstoffverbrauchs, der Emissionen und damit von Betriebskosten dar.



**Energiebedarf der industriellen Stoffbehandlung**

**Abbildung 1-1: Energiebedarf der verschiedenen Bereiche der Grundstoffindustrie auf unterschiedlichem Temperaturniveau [1].**

Industrieprozesse können durch eine optimierte Verschaltung bzw. Kopplung, durch Wärmerückgewinnungsmaßnahmen oder den Einsatz von Substitutionsbrennstoffen optimiert werden. Optimierte Wärmerückgewinnungsmaßnahmen bei hohen Temperaturen führen jedoch durch das hohe Temperaturniveau und die aggressiven Prozessatmosphären zu geringen Standzeiten von Apparaten aus metallischen Werkstoffen. Besonders bei thermischen Prozessen, in welchen alternative Brennstoffe, wie z.B. Reststoffe bzw. Ersatzbrennstoffe zum Einsatz kommen, werden erhöhte Anforderungen an die chemische Beständigkeit der eingesetzten Werkstoffe gestellt. Besonderes Augenmerk ist daher auf die Werkstoffauswahl zu legen, um lange Standzeiten zu garantieren. Keramische Werkstoffe können hierfür als Lösungsmöglichkeit betrachtet werden.

## 2 BEWERTUNG VON MASSNAHMEN ZUR ENERGIE-EINSPARUNG BEI INDUSTRIELLEN PROZESSEN

### 2.1 Energieaustauschverhältnis

Analog zu anderen Kenngrößen zur energetischen Bewertung von Prozessen, wie z.B. dem Wirkungsgrad, ist auch bei der Betrachtung von Energieaustauschverhältnissen [2] ebenfalls eine Bewertung von Teilprozessen durchzuführen, woraus anschließend die Bewertung des Gesamtprozesses erfolgt. Im Einzelnen ist zu unterscheiden zwischen:

- einem Energieaustauschverhältnis durch Substitution von Brennstoffen ohne Prozessoptimierung bei unveränderter Produktionsleistung und
- Energieaustauschverhältnissen mit Berücksichtigung von Maßnahmen zur Prozessoptimierung bei ebenfalls unveränderter Produktionsleistung.

Wesentlich für die Bestimmung der Energieaustauschverhältnisse und einer Bewertung der Veränderungen im Prozess durch die Substitution, sind die kalorischen Eigenschaften der Brennstoffe, wie Heizwert, Mindestluftbedarf, die sich daraus ergebende Mindestabgasmenge und die adiabate Verbrennungstemperatur.

Das Energieaustauschverhältnis wird im Weiteren durch prozesstechnische Randbedingungen beeinflusst. Darunter sind z.B. der in Abhängigkeit der Brennstoffstufung notwendige Luftüberschuss für die Brennstoffe, optionale Brennstoff- oder Luftvorwärmung aber auch Verluste an Oberflächen und über das Abgas zu verstehen.

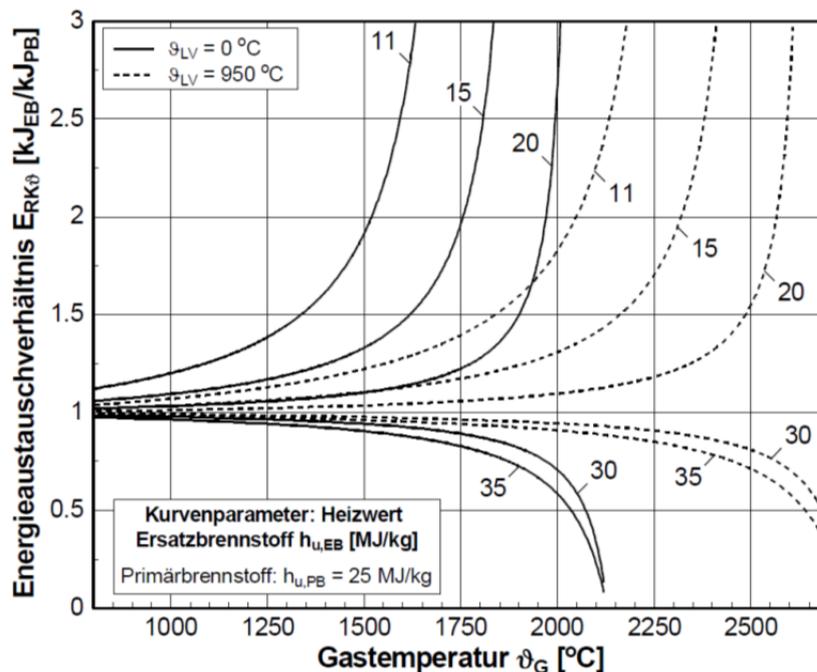
#### 2.1.1 Bewertung von Effekten zur Effizienzsteigerung durch eine Brennstoffsubstitution

Für thermische Prozesse gilt, dass im Sinne einer stabilen Produktion und gleichbleibend guter Qualität der Erzeugnisse bei einer Brennstoffsubstitution identische Prozessparameter, wie gleiche Guttemperatur und der an das Gut übertragene Wärmestrom anzustreben sind. Da üblicherweise im Vergleich zum Regelbrennstoff niederkalorische Brennstoffe für die Substitution eingesetzt werden, also einen niedrigeren Heizwert aufweisen, sinkt im Regelfall die Verbrennungstemperatur. Um die an das Gut übertragene Energie in diesem Fall konstant zu halten, bleibt als Möglichkeit die Erhöhung des Verbrennungsgasmassestroms  $\dot{m}_{VG}$ . Dieser beinhaltet den sich aus der Verbrennungsrechnung ergebenden Luftmassenstrom in Abhängigkeit des eingesetzten Brennstoffes und dem Brennstoffmassenstrom.

Das oben vorgestellte Energieaustauschverhältnis  $E$  beschreibt das Verhältnis des chemisch gebundenen Brennstoffenthalpiestromes des Substitutionsbrennstoffes zu dem des Regelbrennstoffs nach Gleichung 2-1:

$$E = \frac{\dot{m}_{SB} \cdot h_{u,SB}}{\dot{m}_{RB} \cdot h_{u,RB}} \quad 2-1$$

Die Auswirkungen von Maßnahmen zur Brennstoffsubstitution, welche über das Energieaustauschverhältnis beschrieben werden können, sind beispielhaft für eine statische Betrachtung [3], also unveränderter Gastemperatur, in Abbildung 2-1 dargestellt.



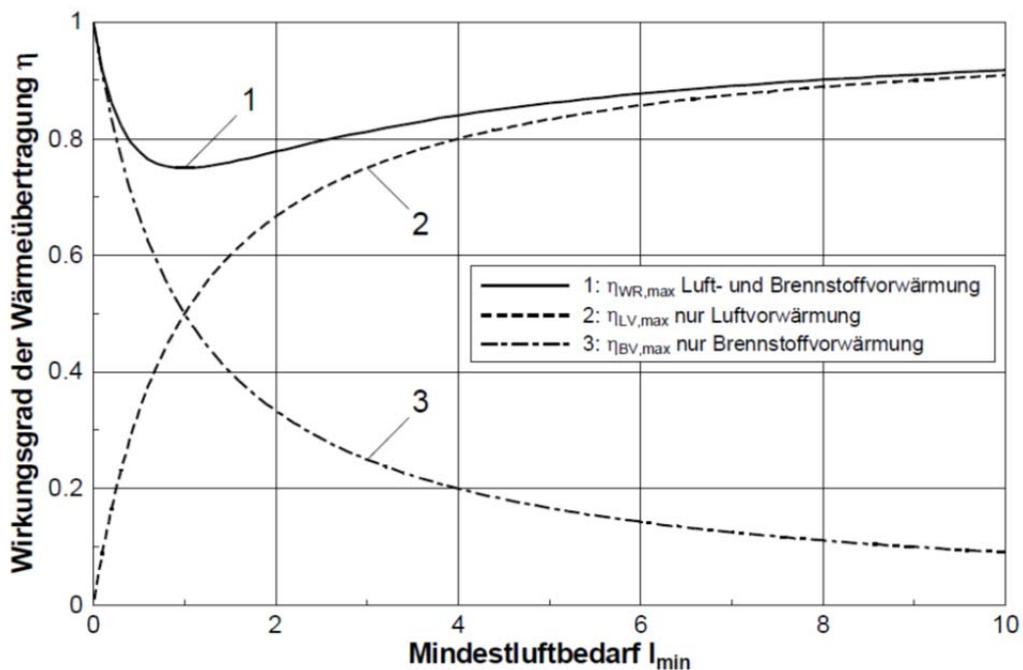
**Abbildung 2-1: Energieaustauschverhältnis bei statischer Betrachtung [3].**

Aus Abbildung 2-1 geht hervor, dass das Energieaustauschverhältnis Werte größer 1 annimmt, je höher die Gastemperatur sein muss und je geringer der Heizwert des Substitutionsbrennstoffs im Vergleich zum Regelbrennstoff ist. Werden höher kalorische Brennstoffe zur Substitution eingesetzt nimmt  $E$  Werte kleiner 1 an. Zur Verdeutlichung der Effekte von Optimierungsmaßnahmen sind in Abbildung 2-1 die Auswirkungen einer Luftvorwärmung (LV) auf 950 °C und damit von Wärmerückgewinnungsmaßnahmen im Hochtemperaturbereich dargestellt. So ist zu erkennen, dass mit niederkalorischen Brennstoffen von ca. 15 MJ/kg ohne Luftvorwärmung keine Gastemperaturen über 1750 °C und einem niedrigen Energieaustauschverhältnis erreicht werden können. Dadurch wird deutlich, dass eine alleinige Betrachtung der Brennstoffsubstitution für eine umfassende Prozessoptimierung nicht ausreicht, sondern dass vielmehr eine Kombination aus Brennstoffsubstitution und verfahrenstechnischer Prozessoptimierung untersucht werden muss, um möglichst geringe Energieaustauschverhältnisse zu erzielen.

### 2.1.2 Auswirkungen von Effizienzsteigerungsmaßnahmen durch eine geänderte Prozessführung

Im vorhergehenden Abschnitt wurde der Einfluss von technologischen Optimierungsmaßnahmen am Beispiel der Luftvorwärmung bereits deutlich. In Abbildung 2-1 ist zu erkennen, dass beim Einsatz niederkalorischer Brennstoffe ein höherer Energieinhalt für den Prozess zur Verfügung steht als wenn ein höher kalorischer Brennstoff ohne Luftvorwärmung zum Einsatz kommt, wenn z.B. der Fall einer Luftvorwärmung mit betrachtet wird. Eine solche Luftvorwärmung ist allerdings nur vor den speziellen Aspekten der Hochtemperaturwärmeübertragung zu sehen.

Bei Anlagenoptimierungen sind jedoch weitere Faktoren, wie Mindestluftbedarf und Luftüberschusszahl zu berücksichtigen, welche direkten Einfluss auf den Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung haben. Abbildung 2-2 zeigt den Zusammenhang zwischen Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnungsmaßnahme und dem Mindestluftbedarf für den Prozess.



**Abbildung 2-2: Wirkungsgradentwicklung bei Einsatz einer Luft- bzw. Brennstoffvorwärmung und Kombination der beiden Optimierungsmaßnahmen [4].**

Es wird deutlich, dass eine Brennstoffvorwärmung einen hohen Effekt bei niedrigen Mindestluftzahlen und damit niederkalorischen Brennstoffen erzielt. Gleichzeitig zeigt sich, dass der Effekt einer Luftvorwärmung bei hohen Luftzahlen und damit heizwertreichen Brennstoffen zum Tragen kommt. Eine Kombination beider Maßnahmen führt bereits bei niedrigen Mindestluftzahlen zu einem hohen Wirkungsgrad der Wärmeübertragung.

Eine Betrachtung der Heizwerte von Regel- und Substitutionsbrennstoff ergibt für ein fallendes Heizwertverhältnis ein ansteigendes Mindestabgasmengenverhältnis. Bei gleichzeitig ansteigenden Energieaustauschverhältnis ( $E > 1$ ) kommt es prozessbedingt zu einem stärkeren Anstieg des Mindestabgasmengenverhältnisses. Da die Substitution unter der Vorgabe konstanter Prozessparameter, also auch konstanter Abgastemperatur erfolgt, steigt durch diesen Zusammenhang der Abgasverlust des Prozesses. Dies führt zu einer Zunahme des spezifischen Abgasenergieverlustes durch den steigenden Abgasmassenstrom bei gleicher Abgastemperatur vor der Substitution. Eine Möglichkeit zur Reduktion des spezifischen Energiebedarfs kann eine Wärmerückgewinnung, wie die bereits angesprochenen Maßnahmen zur Brennstoff- oder Luftvorwärmung oder eine Nutzung von Abwärmeströmen für weitere Prozessschritte sein.

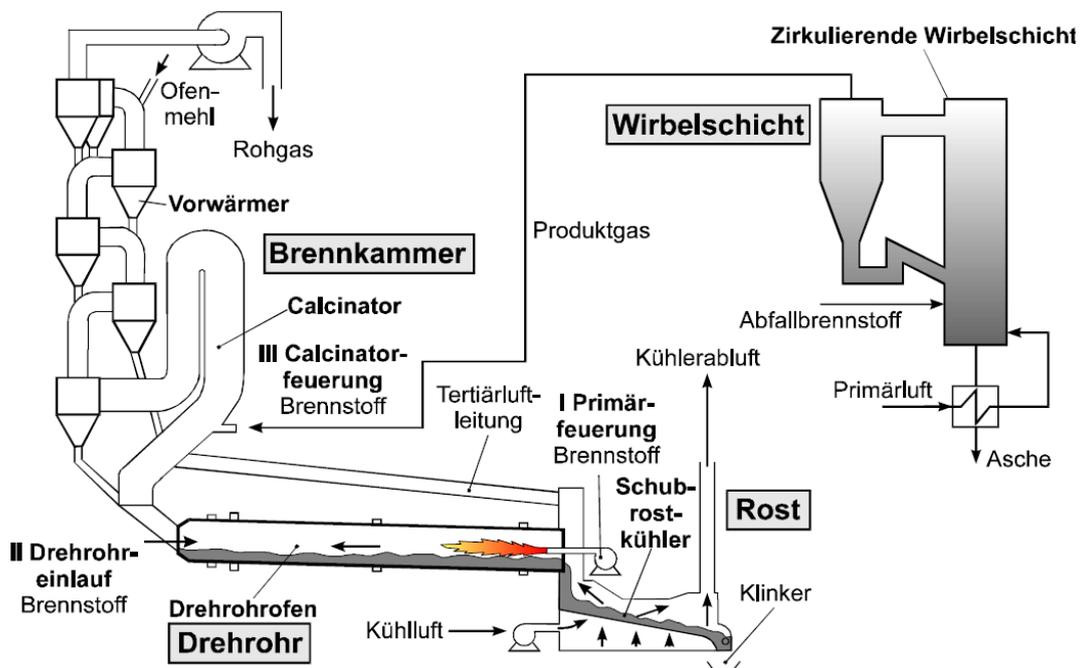
Neben diesen Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung für externe Maßnahmen können auch Schritte zur prozessinternen Wärmerückgewinnung ergriffen werden. Dies kann durch eine veränderte Prozessführung durch eine verbesserte Abstimmung des Wärmekapazitätsstromverhältnisses oder auch durch eine optimierte Brennstoff- und Luftstufung und eine Aufteilung auf verschiedene Prozessschritte erfolgen. Solche Maßnahmen bieten sich insbesondere bei mehrstufigen Produktionsprozessen auf unterschiedlichem Temperaturniveau an. Insbesondere durch geschickte Brennstoffstufung kann ein Energieaustauschverhältnis für den Gesamtprozess nach der Substitution nahe 1 erreicht werden. Eine Brennstoffstufung und damit prozessinterne Wärmeverschiebung durch Nutzung von Abwärmeströmen energetisch höherwertiger Teilprozessschritte ist immer vor dem Hintergrund der Temperaturniveaus der beteiligten Teilprozesse und der jeweiligen Wärmeübertragungsbedingungen zu betrachten und anschließend auf den Gesamtprozess zu übertragen.

Durch den Einsatz eines Substitutionsbrennstoffes ändert sich durch die veränderte chemische Zusammensetzung in der Regel das Wärmekapazitätsstromverhältnis zwischen Heizgas und dem zu erwärmenden Gut. Es ist davon auszugehen, dass vor dem Hintergrund konstanter Produktionsbedingungen der Wärmekapazitätsstrom, also Massenstrom und Wärmekapazität des Erzeugnisses wiederum gleich bleiben. Im Vergleich zum Regelbrennstoff wird der Substitutionsbrennstoff einen niedrigeren Heizwert aufweisen. Dies bedingt einen höheren Brennstoffmassenstrom zur Erreichung des nach wie vor konstanten Energieeintrages und der erforderlichen Prozesstemperaturen. Ein höherer Brennstoffmassenstrom erhöht zwangsläufig den Abgas- bzw. Heißgasmassenstrom und damit den Wärmekapazitätsstrom auf der Heizgasseite. Das Wärmekapazitätsstromverhältnis ändert sich somit. Diese Veränderungen müssen unbedingt bei der Bewertung einer energetischen Optimierungsmaßnahme berücksichtigt werden, da hierdurch unerwünschte Effekte, wie z.B. eine Absenkung der Prozesstemperaturen auftreten können.

## 3 PROZESSE DER GRUNDSTOFFINDUSTRIE

### 3.1 Klinkerbrennprozess

Am Beispiel eines Klinkerbrennprozesses im Trockenverfahren mit Calcinator in der Zementindustrie werden die energetischen und prozesstechnischen Auswirkungen einer Brennstoffsubstitution mittels Gasbereitstellung aus einer Zirkulierenden Wirbelschichtvergasung [5] betrachtet. Die folgende Abbildung 3-1 stellt ein Verfahrensschaltbild des Klinkerbrennprozesses dar.



**Abbildung 3-1:** Schematische Darstellung des Klinkerbrennens nach dem Trockenverfahren mit Calcinator und externer Vergasung in zirkulierender Wirbelschicht (ZWS) [2].

Theoretisch kann an allen drei in Abbildung 3-1 dargestellten Brennstoffaufgaben auch Substitutionsbrennstoff aus der Ersatzbrennstoffvergasung in Form des Produktgases eingesetzt werden. Bei näherer Analyse des Prozesses durch vereinfachende Betrachtung der Teilprozesse als Kopplung von zwei Rührkesseln ergeben sich folgende in Abbildung 3-2 aufgetragenen Zusammenhänge zwischen Heizwert- und Energieaustauschverhältnis:

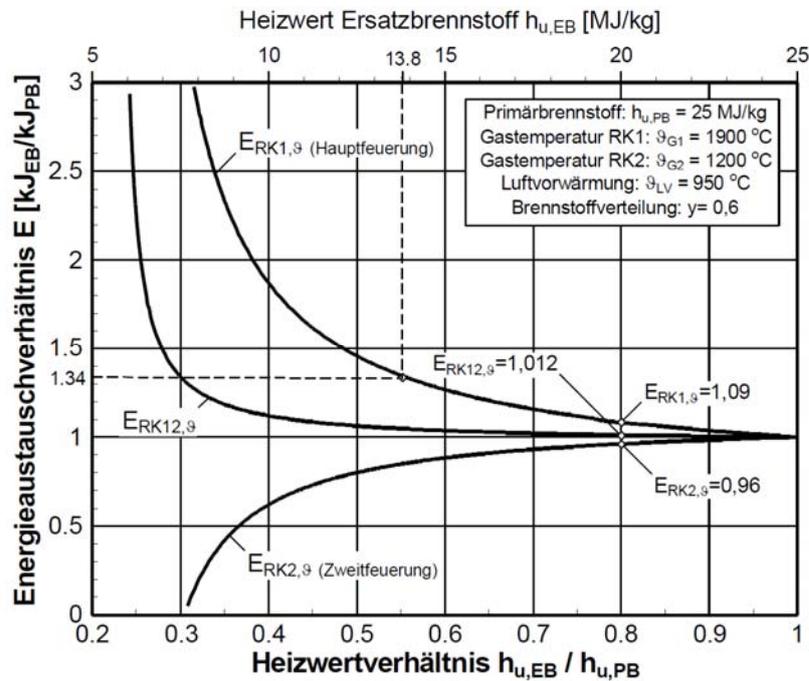


Abbildung 3-2: Energieaustauschverhältnis  $E$  in Abhängigkeit vom Heizwert. [3].

Unter der Vorgabe einer festen Gastemperatur (vgl. Abbildung 3-2) und einem angenommenen Heizwertverhältnis von 0,8 (bei einer Reduzierung des Heizwertes vom Regel- auf den Substitutionsbrennstoff von 25 MJ/kg auf 20 MJ/kg) ergeben sich durch diese Betrachtung für den Brennprozess im Drehrohrföfen (RK1) ein Energieaustauschverhältnis von  $E_{RK1,\vartheta} = 1,09$  und für die Calcinatorstufe ein  $E_{RK2,\vartheta} = 0,96$ . Der Gesamtprozess weist mit einem Energieaustauschverhältnis  $E_{RK12,\vartheta} = 1,012$  einen Wert von annähernd 1 auf und ist damit bereits als weitestgehend optimiert einzuschätzen.

Eine Substitution des Regelbrennstoffs durch einen niederkalorischen Brennstoff in der Calcinatorfeuerung ist aufgrund der im Vergleich zum Brennprozess deutlich niedrigeren Gastemperaturen von 1200 °C (vgl. Abbildung 3-2) das Energieaustauschverhältnis an dieser Stelle von geringerer Bedeutung (vgl. Abbildung 2-1).

Wie bereits erwähnt, steigen durch die Brennstoffsubstitution mit niederkalorischen Brennstoffen bei gleichen Randbedingungen des Produktionsprozesses die Abgasmen-gen und damit die Abgasverluste. Zur Abschätzung der Auswirkungen ist in jedem Fall eine Gesamtenergie- und -massenbilanz ähnlich dem nachfolgenden vereinfachten Beispiel für den Klinkerbrennprozess aufzustellen (vgl. Abbildung 3-3).

Flussdiagramm:

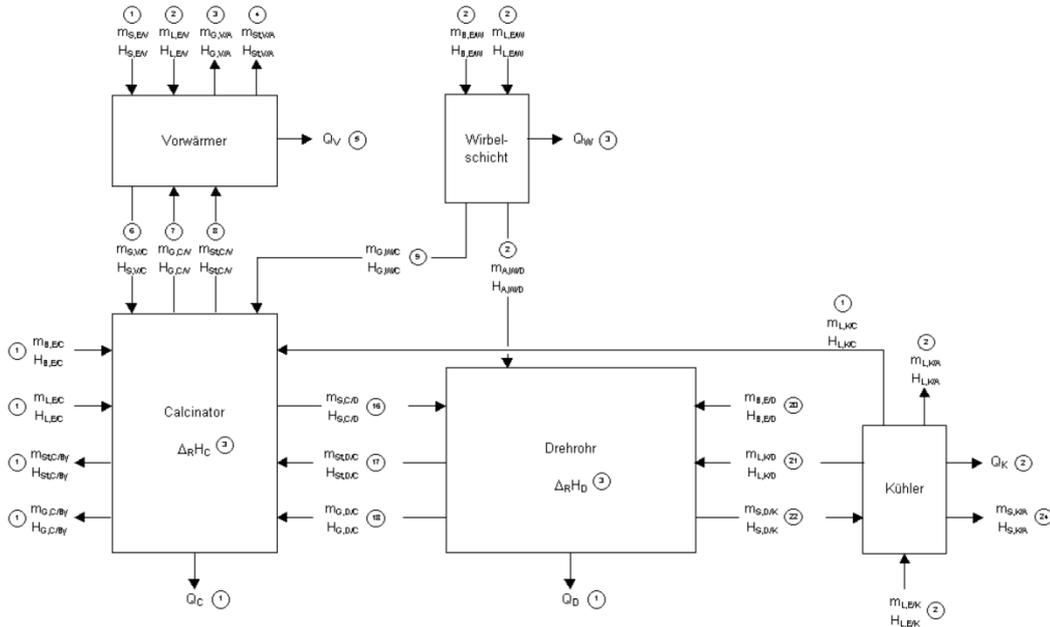
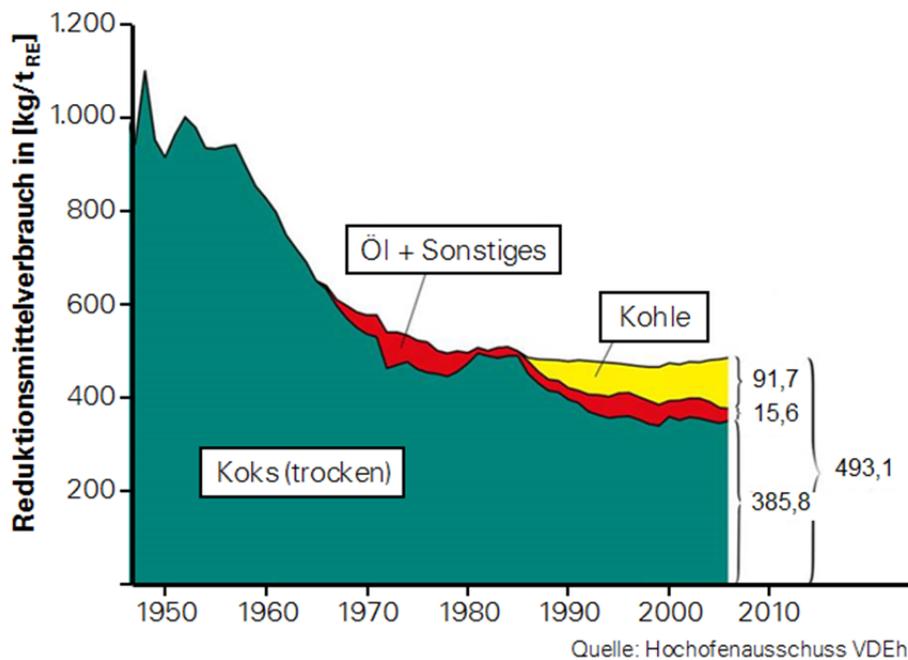


Abbildung 3-3: Bilanzschema für die Massen- und Energiebilanz des Klinkerbrennprozesses in Anlehnung an den in Abbildung 3-1 dargestellten Produktionsprozess [2].

Weiterhin zeigt das in Abbildung 3-2 dargestellte Beispiel des Klinkerbrennprozesses die Bedeutung einer Luftvorwärmung und einer Vorwärmung des Gutes. Ohne diese Schritte ist eine Darstellung des Prozesses in dieser Art und Weise nicht möglich. Das Beispiel zeigt durch die Luftvorwärmung auf Temperaturen von 950 °C wiederum die Bedeutung der Hochtemperaturwärmeübertragung im Bereich der Grundstoffindustrie.

### 3.2 Produktionsprozesse in der Stahlindustrie

Ebenso wie in anderen Industriebereichen wurden in der Vergangenheit auch in der stahlerzeugenden Industrie die Anstrengungen für eine höhere Energieeffizienz und geringere Emissionen verstärkt. Die Entwicklung des Reduktionsmittelverbrauchs und damit der Kohlenstoffeinsparung insbesondere aus Koks bei Hochofenprozessen zeigt Abbildung 3-4.

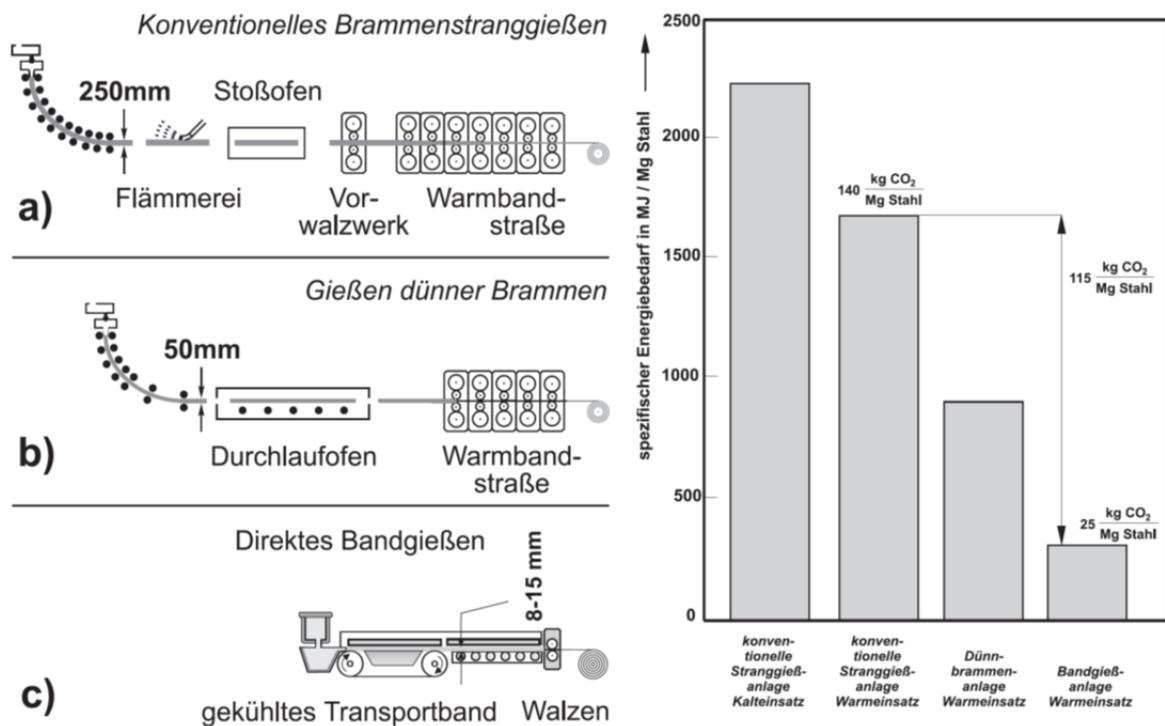


**Abbildung 3-4: Beispiel zum Einsparpotential bei bestimmten Prozessen: Kohlenstoffverbrauch Hochofenprozesse, nach [6], [7].**

Abbildung 3-4 zeigt durch die Degression des Kohlenstoffverbrauchs in Hochofenprozessen eine deutliche Optimierungsentwicklung von über 50 % gegenüber den 1950er Jahren [7]. Der asymptotische Verlauf der letzten Jahrzehnte zeigt jedoch, dass diese Prozesse heute an einem thermodynamischen und verfahrenstechnischen Minimum angekommen sind [7]. Weitere wesentliche Effizienzsteigerungen lassen sich in einem solchen Stadium nur durch neue Prozesse bzw. Verfahren und damit neuen Materialien realisieren.

### 3.2.1 Beispiel Dünnbandgießen

Ein Beispiel für eine erfolgreiche Optimierung in einem neuen Prozess in der Stahlindustrie ist das sogenannte DSC<sup>2</sup>-Verfahren, auch Dünnbandgießen genannt [7] - [9]. Bei diesem Verfahren wird der Stahl direkt aus der flüssigen Schmelze auf ein umlaufendes Transportband gegossen und gekühlt. Dadurch erstarrt der Stahl zu einem bis zu 15 mm starken Band und kann über nachgeschaltete Walzverfahren direkt zu Coils verarbeitet werden [9]. Der Prozess läuft unter einer Schutzgasatmosphäre ab um eine Oxidation des heißen Materials zu vermeiden. In der folgenden Abbildung 3-5 sind verschiedene Verfahrensschemata für Brammen- bzw. Bandgießverfahren und die Entwicklung des spezifischen Energiebedarfs pro Tonne erzeugtem Stahlband dargestellt.



**Abbildung 3-5: Entwicklungsschritte vom konventionellen Brammengießprozess hin zum direkten Bandgießprozess und zugeordneter Energiebedarf bzw. entsprechender CO<sub>2</sub>-Ausstoß pro Tonne Banderzeugnis [8].**

<sup>2</sup> DSC: engl: Direct Strip Casting – Verfahren zur direkten Erzeugung von Bandmaterial in der Halbzeugherstellung

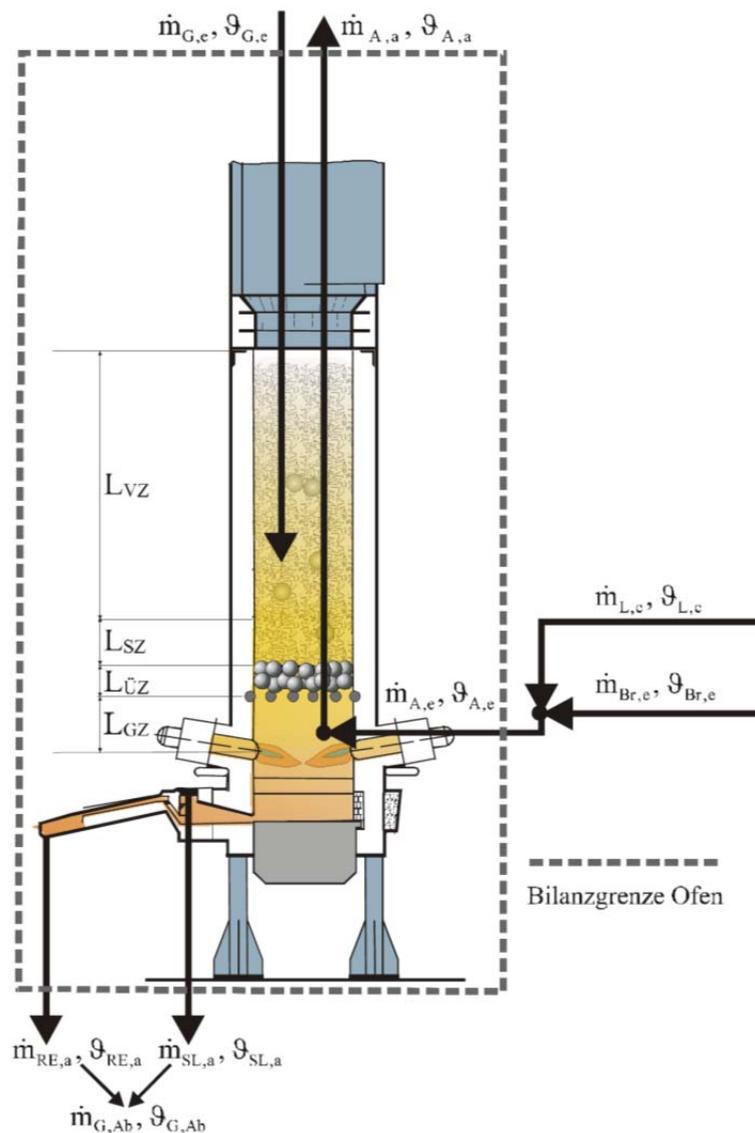
Neben der Einsparung an technologischen Schritten wird der Produktionsprozess im hier angesprochenen Beispiel Dünbandgießen ebenfalls durch einen deutlichen Rückgang des spezifischen Energiebedarfs [7], [8] und durch eine massive Einsparung an CO<sub>2</sub> charakterisiert.

Auch bei modernen Verfahren zur Stahlblecherzeugung sind weitere Optimierungsmaßnahmen durch hochtemperatur- und korrosionsbeständige Wärmeverschiebemaßnahmen denkbar. So erscheint eine Rückgewinnung von Abwärmeströmen beispielsweise aus der Kühlung des Stahlgusses auf dem Transportband und der anschließenden Nutzung in weiteren Prozessschritten beim Dünbandgießen möglich.

Auch in diesem Fall können entsprechende keramische Hochtemperaturwärmeübertrager eingesetzt werden.

### 3.2.2 Beispiel Koksloser Kupolofen

Eine Weiterentwicklung des Kokskupolofens stellt der sogenannte „Kokslose Kupolofen“ zur Erschmelzung von Gusschrott dar, welcher mit Erdgas anstatt mit Koks beheizt wird. Durch die Einführung neuer Technologien, wie dem kokslosen Kupolofen (KLKO) (Abbildung 3-6), konnte sowohl der spezifische Energiebedarf als auch der spezifische  $\text{CO}_2$ -Ausstoß deutlich reduziert werden (Abbildung 3-7).

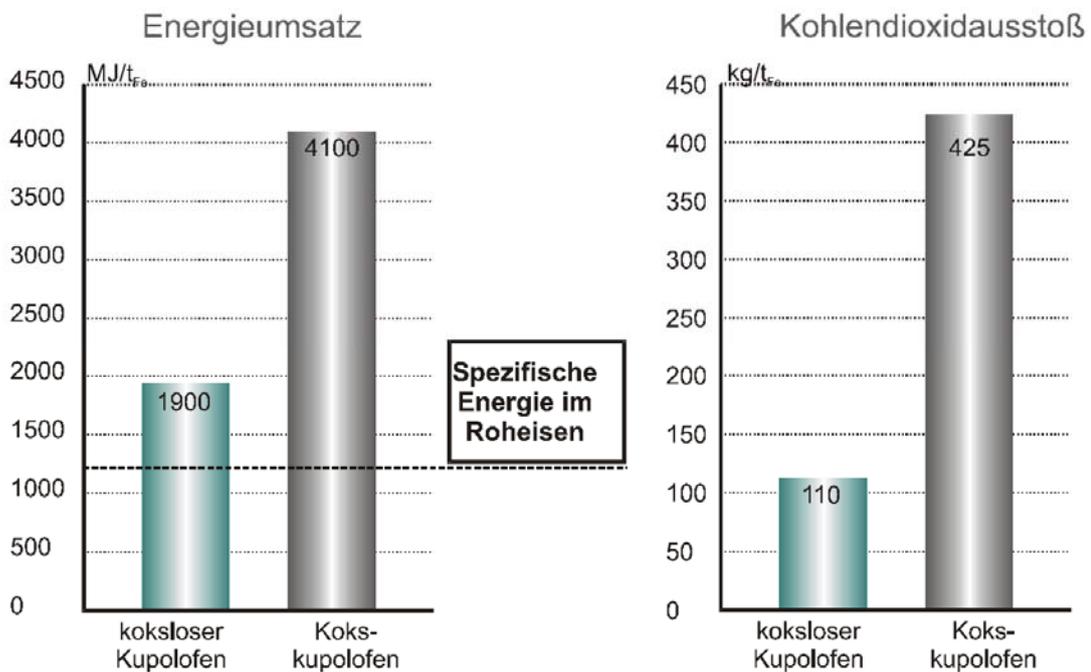


**Abbildung 3-6:** Schematische Darstellung des kokslosen, erdgasbetriebenen Kupolofens mit ein- und austretenden Bilanzströmen [2].

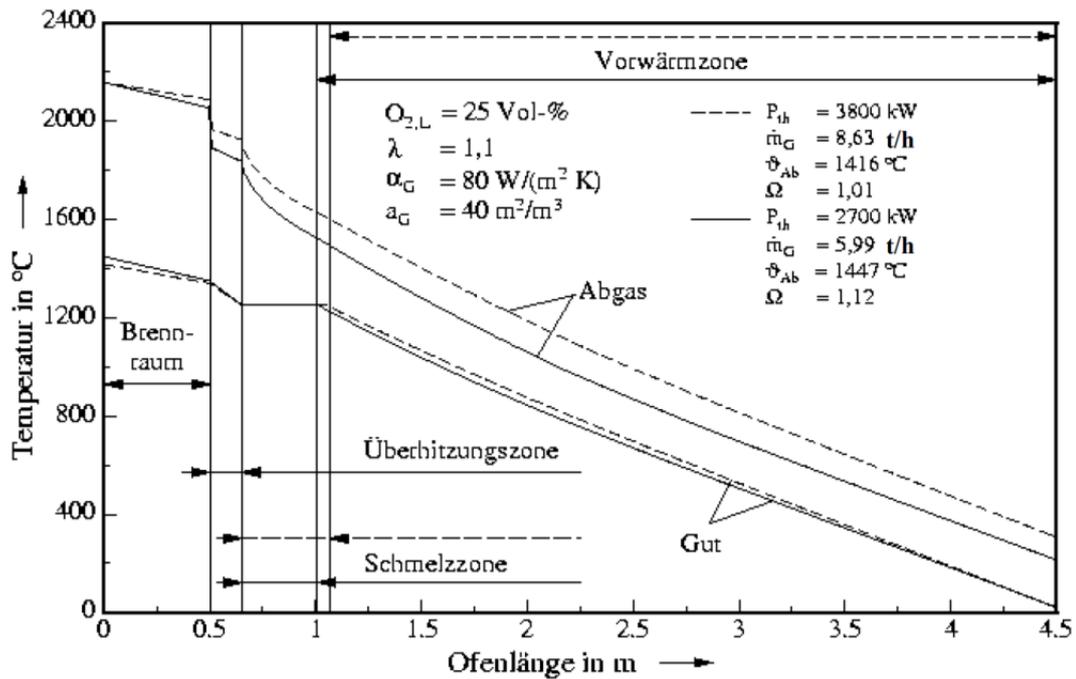
Anhand der Technologie des KLKO [10] soll der Einfluss sich verändernder Wärmekapazitätsstromverhältnisse auf den Prozess erläutert werden. Durch eine Steigerung der thermischen Leistung ist zunächst eine Erhöhung der Produktionsleistung zu erwarten, welche sich in einer Menge an geschmolzenem Gusschrott bei einer bestimmten Abstichtemperatur ausdrückt.

Praktische Erfahrungen und auch die Modellierung des Schmelzprozesses [10] – [13] mittels einer Rührkesselkaskadenschaltung zeigen allerdings, dass sich wie erwartet die Schmelzleistung erhöht, die Abstichtemperatur jedoch sinkt [12]. Dieses zunächst unerwartete Phänomen lässt sich anhand der in Abbildung 3-8 dargestellten Zusammenhänge erklären. Durch die Leistungssteigerung erhöht sich der Wärmekapazitätsstrom des Verbrennungsgases, wodurch das Wärmekapazitätsstromverhältnis verschoben wird. Durch den höheren Wärmekapazitätsstrom des Abgases kann mehr Energie in

das Gut übertragen werden, wodurch sich die Vorwärmzone verkürzt. Konstruktionsbedingt ist die Überhitzungszone des Schmelzofens mit einer konstanten Länge ausgeführt, was zur Folge hat, dass sich die Schmelzzone vergrößert, was in einer gesteigerten Schmelzleistung resultiert. Da sich die Überhitzungszone nicht an die gestiegene Schmelzleistung anpassen lässt, sinkt infolgedessen die Austritts- (Abstich)-temperatur des Schmelzgutes. Anhand dieses Beispiels wird deutlich, dass eine konsequente verfahrenstechnische Analyse des zu optimierenden Prozesses notwendig ist, um negative Auswirkungen auf das Erzeugnis, wie eine sinkende Abstichtemperatur, bei einer vermeintlichen Leistungssteigerung zu vermeiden und eine gleichbleibende Produktqualität zu gewährleisten.



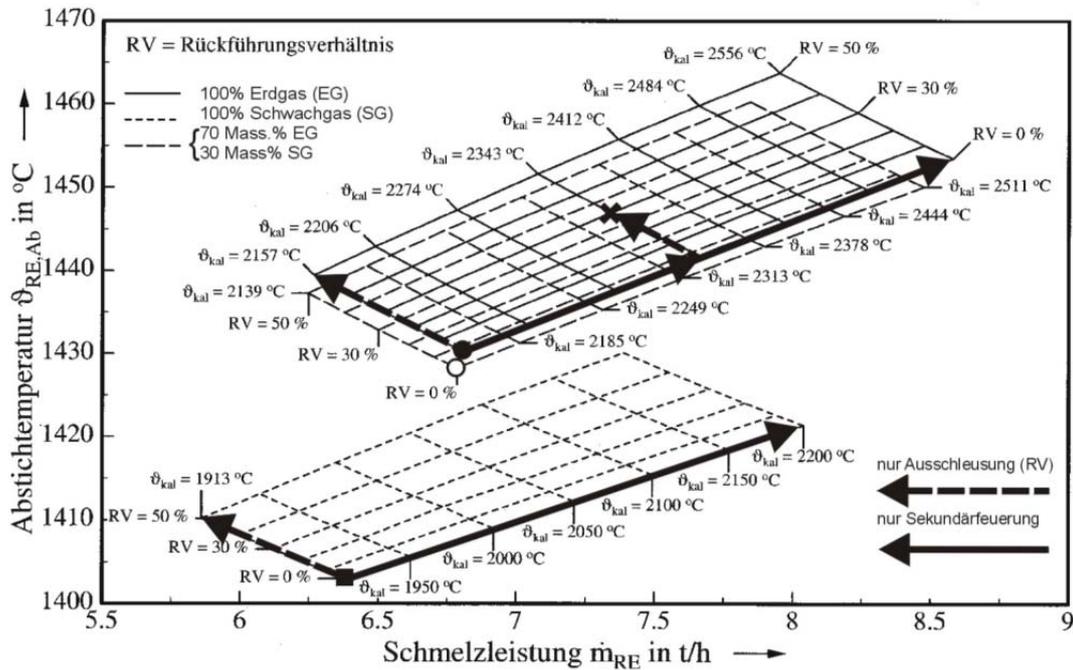
**Abbildung 3-7: Spezifischer Energieumsatz und Kohlendioxid ausstoß von Verfahren nach dem Prinzip des kokslosen Kupolofens als auch des Koks-kupolofens [2].**



**Abbildung 3-8: Temperatur-, Schmelzleistung- und Abstichtemperaturänderung durch Steigerung der thermischen Leistung, nach [2].**

Eine weitere Option zur Prozessoptimierung stellt die Substitution von Erdgas durch Produkt- oder Prozessgase (z.B. Vergasungsgas oder Gichtgas) dar. Jedoch sind auch in diesem Fall sowohl Teilprozesse als auch der Gesamtprozess hinsichtlich der Auswirkungen verfahrenstechnisch zu betrachten. Dabei wird zunächst die vollständige Substitution des Regelbrennstoffes Erdgas durch ein Schwachgas, z.B. aus einer Vergasungsanlage betrachtet. Die in Abbildung 3-9 dargestellten Ergebnisse zeigen deutlich, dass mit unverändertem Prozess, gemäß Abbildung 3-6, und konstanter thermischer Leistung das Produktionsziel hinsichtlich Schmelzleistung und Abstichtemperatur nicht erreichbar ist. In Abbildung 3-9 werden sowohl die Ausgangssituation der Beheizung mit Erdgas, als auch der Substitutionsfall mit Schwachgas, zwei Optimierungsmaßnahmen für sich in Form von Abgasausschleusung oder Zusatzfeuerung, die Kombination beider Verfahren und auch der Effekt einer Brennstoffmischung gezeigt.

Abbildung 3-9 zeigt, dass Schmelzleistung und auch Abstichtemperatur durch die Brennstoffsubstitution deutlich absinken. Hintergrund ist wiederum eine Erhöhung des Wärmekapazitätsstromes des Verbrennungsabgases bedingt durch den niedrigeren Heizwert des Substitutionsbrennstoffes. Gegenmaßnahmen können z.B. durch eine Abgasausschleusung in der Vorwärmzone und damit eine Reduzierung des Wärmekapazitätsstromes des Verbrennungsabgases oder durch eine Zusatzfeuerung bzw. durch eine prozessinterne Wärmerückgewinnung ergriffen werden.



**Abbildung 3-9: Betriebsverhalten eines kokslosen Kupolofens bei Substitution des Regelbrennstoffes Erdgas mit einem Schwachgas und bei Optimierungsmaßnahmen [2].**

- 100% Erdgas, Verfahrensvariante nach Abbildung 3-6
- 100% Schwachgas, Verfahrensvariante nach Abbildung 3-6
- 70 % Erdgas und 30 % Schwachgas Verfahrensvariante nach Abbildung 3-6
- ◆ Kombination aus Ausschleusung (30 % Ausschleusung bis zum Erreichen der Verbrennungstemperatur von 2343  $^{\circ}C$ ) und Sekundärfeuerung

In Abbildung 3-9 sind die verfahrenstechnischen Effekte einer Prozessoptimierung durch eine definierte Abgasausschleusung und Zusatzfeuerung dargestellt. Eine alleinige Abgasausschleusung führt durch die Reduzierung des Wärmekapazitätsstromes und einer damit einhergehenden längeren Vorwärmzone zu einem Anstieg der Abstichtemperatur, allerdings bei deutlich reduzierter Schmelzleistung. Eine längere Vorwärmzone bedingt bei konstanter Überhitzungszone eine sich verkürzende Schmelzzone, so dass weniger Material erschmolzen werden kann. Weniger erschmolzenes Material bedeutet einen geringeren Wärmekapazitätsstrom auf der Gutseite, so dass höhere Abstichtemperaturen erreicht werden können.

Der Einfluss einer Zusatzfeuerung (Sekundärfeuerung) zur Luft- und Brennstoffvorwärmung ohne Abgasausschleusung ist ebenfalls in Abbildung 3-9 dargestellt. Ohne Abgasausschleusung bleibt der Wärmekapazitätsstrom auf der Abgasseite konstant, die Verbrennungstemperatur der Primärfeuerung wird jedoch durch die Vorwärmung deutlich erhöht. Durch diese Maßnahme werden sowohl die Abstichtemperatur als auch die Schmelzleistung erhöht.

Durch eine prozessinterne Wärmerückgewinnung zur Nutzung des Enthalpiestroms des ausgeschleusten Abgases für die Luft- und Brennstoffvorwärmung kann das Verfahren weiter optimiert werden und eine Zusatzfeuerung vermieden werden.

Für die Optimierungsmaßnahmen durch Zusatzbrenner und interne Wärmerückgewinnung sind spezielle Hochtemperaturwärmeübertrager notwendig. Bei den betrachteten Prozessen handelt es sich um Wärmeübertragungsvorgänge auf einem hohen Temperaturniveau bei stark belasteten Atmosphären. Zur Sicherstellung eines wirtschaftlichen Betriebes sind hier hochtemperaturbeständige und korrosionsstabile Werkstoffe, wie z.B. technische Keramiken einzusetzen.

### **3.2.3 Hochtemperaturwärmeübertragung**

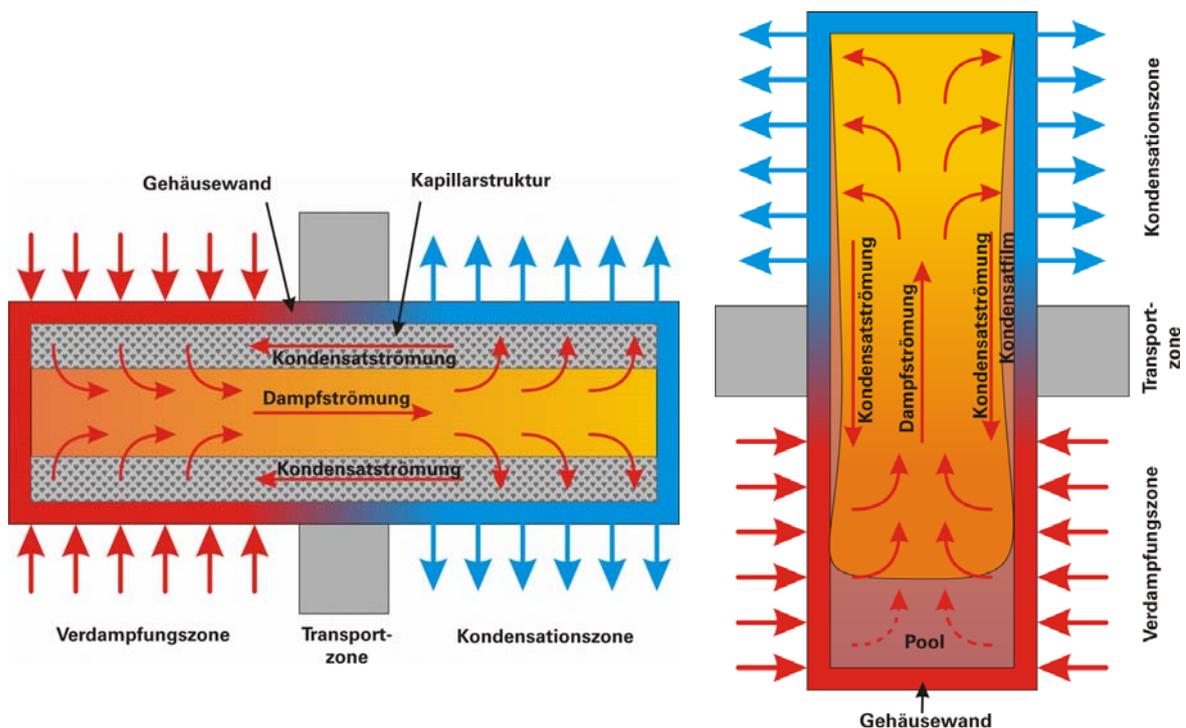
Apparate zur Hochtemperaturwärmeübertragung sind bei hohen Oberflächentemperaturen und / oder korrosiver Atmosphäre sehr starken Belastungen ausgesetzt. Hochtemperaturanwendungen aus dem Industrie- und Kraftwerksbereich schließen die Verwendung metallischer Werkstoffe zum einen aufgrund des Temperaturniveaus, aber auch aufgrund der korrosiven und abrasiven Atmosphäre aus. Alternativ können hochtemperatur- und korrosionsbeständige keramische Materialien eingesetzt werden. Aus der großen Bandbreite keramischer Werkstoffe bieten sich besonders aus der Gruppe der Siliciumcarbid-Keramiken<sup>3</sup> (SiC) verschiedene Werkstoffe für den Einsatz unter hohen Temperaturen und aggressiven Atmosphären aufgrund ihrer vorteilhaften Eigenschaften an.

Diese Eigenschaften sind bei den SiC-Keramiken unter anderem die gute Wärmeleitfähigkeit, die hohen maximal zulässigen Einsatztemperaturen bis 1400 °C, die hohe Temperaturwechselbeständigkeit, die guten Festigkeitswerte und die gute Verschleißfestigkeit. Nachteilig wirkt sich der im Vergleich zu metallischen Werkstoffen höhere Fertigungs- und der höhere Fügeaufwand aufgrund spezifischer Verarbeitungseigenschaften von keramischen Werkstoffen aus. Um den Fertigungsaufwand zu minimieren, sind deshalb einfache Geometrien und Konstruktionen beim Bau keramischer Wärmeübertrager anzustreben.

---

<sup>3</sup> Siliciumcarbid (SiC): Gruppe keramischer Werkstoffe, basierend auf Silicium und Kohlenstoff.

Eine leistungsfähige und gleichzeitig geometrisch einfache Lösung stellt der Einsatz von Wärmeübertragungseinheiten dar, die nach dem Funktionsprinzip des Wärmerohrs<sup>4</sup> arbeiten [14]; [15]. Wärmerohre (vgl. Abbildung 3-10) mit keramischem Mantel sind geeignet dem kombinierten Angriff aus Hochtemperatur- und korrosiver Belastung standzuhalten. Die Einzelwärmerohre können zu großen Bündeln zusammengefasst werden und bilden somit einen leistungsfähigen Verbund aus kleinen, in sich geschlossenen Einheiten, zur Übertragung großer Wärmeströme [16].



**Abbildung 3-10: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Wärmerohres mit Kapillarstruktur (links) und eines Thermosiphons (rechts) [16].**

<sup>4</sup> Wärmerohr: Geschlossener wärmetechnischer Apparat, in welchem ein Arbeitsmedium in einem zweiphasigen Prozess durch Verdampfung und Kondensation zirkuliert. Es wird zwischen Wärmerohren mit Kapillarstruktur und Thermosiphons unterschieden. Thermosiphons benötigen im Gegensatz zur Wärmerohren mit Kapillarstruktur die Schwerkraftwirkung zur Rückführung des flüssigen Arbeitsmediums.

Durch den modularen Aufbau von Wärmerohr-Wärmeübertragern lassen sich die Wärmerohre sehr genau auf die im Apparat lokal vorherrschenden Anforderungen bezüglich des Temperaturniveaus durch Modifikation von Mantelwerkstoff und Arbeitsmedium anpassen [15]; [16]. Defekte Rohre sind unproblematisch auszutauschen.

## **4 ZUSAMMENFASSUNG**

Optimierungsmaßnahmen bei industriellen Produktionsprozessen werden durch technologische Maßnahmen und durch Energieeinsparungen realisiert. Insbesondere bei Hochtemperaturprozessen bietet sich auf den ersten Blick der Ersatz von Regelbrennstoffen durch alternative Brennstoffe an. Bei einer solchen Maßnahme sind aber die Auswirkungen auf die Prozessparameter und damit die Erzeugnisqualität zu berücksichtigen. Eine Abschätzung von Auswirkungen einer Brennstoffsubstitution in Produktionsprozessen kann durch das Energieaustauschverhältnis erfolgen. Häufig wird sich bei dieser Maßnahme herausstellen, dass eine alleinige Brennstoffsubstitution nicht zum Ziel führt. Durch die Veränderung von Temperaturen, Wärmekapazitätsströmen etc. sind weitere Maßnahmen, wie z.B. eine Luft- und Brennstoffvorwärmung oder auch der Einsatz einer prozessinternen Wärmerückgewinnungsmaßnahme notwendig. Das Energieaustauschverhältnis gibt an, wie viel Energie des bisherigen Regelbrennstoffes durch die Energie des Substitutionsbrennstoffes bei ansonsten gleichen Prozessparametern (z.B. Schmelzleistung bei der Stahlerzeugung) ersetzt werden kann. Anschließend ist zu bewerten, wie eine Verbesserung des Energieeinsatzes bei den geänderten Randbedingungen des Substitutionsbrennstoffeinsatzes ohne Veränderung des bestehenden Prozesses oder durch zusätzliche Optimierungsschritte erreicht werden kann. Über diese Betrachtungen lässt sich direkt der spezifische Energieverbrauch für Industrieprozesse ermitteln. Werden diese Maßnahmen durch eine Betrachtung der Auswirkungen auf das Gesamtsystem umgesetzt, können Effizienzsteigerungsmaßnahmen erfolgreich durchgeführt werden.

Für Maßnahmen, wie Luft- und Brennstoffvorwärmung oder die prozessinterne Nutzung von Abwärmeströmen werden hochtemperatur- und korrosionsresistente Werkstoffe und Apparate benötigt. Metallische Werkstoffe, wie sie bis heute hauptsächlich zum Einsatz kommen weisen aufgrund der außerordentlichen Belastungen häufig sehr geringe Standzeiten auf und sind für diese Anwendungen ungeeignet. Als Alternative bieten sich für Hochtemperaturanwendungen oder bei aggressiven Atmosphären keramische Werkstoffe an. Der Bau von wärmetechnischen Apparaten aus keramischen Werkstoffen ist momentan noch Stand der Forschung und Entwicklung. Ein vielversprechender Ansatz ist im Einsatz von keramischen Hochtemperaturwärmerohren zu sehen, welche zu nahezu beliebig großen Wärmeübertragern zusammengefasst werden können.

## 5 DANKSAGUNG

Hiermit bedanken sich die Autoren herzlich bei den Fördermittelgebern der Europäischen Union und des Freistaates Sachsen für die großzügige Unterstützung des Teilprojekts ECEMP E3 – CerHeatPipe.



Dieses Projekt wird gefördert aus Mitteln der Europäischen Union und des Freistaates Sachsen

Europa fördert Sachsen.



## 6 LITERATUR

- [1] Scholz, R.: Minderung des Energieeinsatzes in der Grundstoffindustrie. TU Clausthal, Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik. 2009. [http://www.fakultaeten.tuclausthal.de/fileadmin/fakultaet2/Aktuelles/Vortrag\\_Scholz\\_2009.pdf](http://www.fakultaeten.tuclausthal.de/fileadmin/fakultaet2/Aktuelles/Vortrag_Scholz_2009.pdf). Stand: 10.09.2013.
- [2] Beckmann, M.; Horeni, M.; Scholz, R.; Harnaut, T.: Einfluss der Prozessführung auf den spezifischen Energieverbrauch in Verfahren der Grundstoffindustrie beim Einsatz von Ersatzbrennstoffen. In: VDI Berichte 1708. Dortmund: VDI-Verlag GmbH, 2002, S. 131-163. ISBN 3-18-091708-3; ISSN 0083-5560.
- [3] Beckmann, M.; Scholz, R.: Energetische Bewertung der Substitution von Brennstoffen durch Ersatzbrennstoffe bei Hochtemperaturprozessen zur Stoffbehandlung. Teil 1: ZKG International 52 (1999), Nr. 6, S. 287-303. Teil 2: ZKG International 52 (1999), Nr. 8, S. 411-419
- [4] Specht, E.; Jeschar, R.: Beurteilung von Industrieöfen bei Wärmerückgewinnung. Seminar zu Methoden der Energieeinsparung bei Industrieöfen, TU Clausthal, Institut für Energieverfahrenstechnik, 1990.
- [5] Kehl, P.; Scharf, K.-F.; Scur, P.; Wirthwein, R.: Die Betriebsergebnisse aus den ersten 30 Monaten mit der neuen Ofenlinie 5 im Zementwerk Rüdersdorf. ZKG INTERNATIONAL 51 (1998) No. 8, pp. 410-426
- [6] Ameling, D.: Das Energiekonzept der Bundesregierung führt zur Deindustrialisierung Deutschlands. Vortrag: III. Klima- und Energiekonferenz Berlin. 2010. Originalquelle: VDEh, Hochofenausschuss.
- [7] Dahlmann, P., et.al.: Wege zur Effizienzsteigerung in der Stahlindustrie – Faktensammlung. Stahlinstitut VDEh, Wirtschaftsvereinigung Stahl, Düsseldorf. 2010.

- [8] 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.
- [9] Meyer, F.: BINE Informationsdienst – Energieeffizienz mit Hightech-Stählen. Fachinformationszentrum Karlsruhe (Hrsg.). Projektinfo 13/04. 2004. ISSN 0937-8367.
- [10] Davies, M.; Weichert, C.; Scholz, R.: Development of an energetic processing concept for the description of the fusibility of a cokeless, natural gas-fired cupola furnace. Contemporary Problems of Thermal Engineering, ISBN 83-909797-5-6, Gliwice 1998, S. 285-308.
- [11] Davies, M.; Scholz, R.: Energetic Process Model for the natural Gas Fired Cokeless Cupola Furnace. ULIBTK 1999 12. Turkish National Conference on thermal Sciences and Technologies, September 8-10 1999, Sakarya, Turkey.
- [12] Davies, M.; Scholz, R.: Untersuchungen zur Brennstoffsubstitution und Prozessgestaltung an einem kokslosen erdgasbefeuerten Kupolofen. VDI Tagung Fortschrittliche Energiewandlung und -anwendung März 2001.
- [13] Davies, M.; Scholz, R.; Bald, T.: Möglichkeiten der Prozessführung bei gasgefeuerten Kupolöfen für den Einsatz unterschiedlicher Brennstoffe. VDI Bericht 1629, Verbrennung und Feuerungen (20. Deutscher Flammentag), VDI-Verlag, Düsseldorf 2001, ISBN 3-18-091629-X, S. 179-184.
- [14] Pause, J.; Beckmann, M.: Neue Anwendungsgebiete für Wärmerohre. In: Hufenbach, W. A. (Hrsg.): Tagungsband Internationales Kolloquium des Spitzentechnologieclusters ECEMP 2010. TU Dresden, 2010. S. 215 - 225. ISBN 978-3-00-032522-9
- [15] Unz, S.; Beckmann, M.: Berechnungsverfahren für die Auslegung von keramischen Wärmerohr-Wärmeübertragern. In: Hufenbach, W.A.; Gude, M.: ECEMP - European Centre for Emerging Materials and Processes Dresden - Internationales Kolloquium des Spitzentechnologieclusters ECEMP 2011. Dresden 2011. ISBN 978-3-942267-43-4
- [16] Unz, S.: Keramische Wärmerohr-Wärmeübertrager für Hochtemperaturanwendungen – Mathematische Modellierung, experimentelle Untersuchungen und technische Anwendungen. TU Dresden, Institut für Energietechnik, 2012. Dissertation.