



Waldemar Heinbichner (Autor)

## **CFD-basierte Modellierung von Wärme- und Stofftransportvorgängen in einer turbulent durchströmten Festbetschüttung aus Koks**

Waldemar Heinbichner

CFD-basierte Modellierung von  
Wärme- und Stofftransportvorgängen  
in einer turbulent durchströmten  
Festbetschüttung aus Koks



Cuvillier Verlag Göttingen  
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/7021>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,  
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Das Erschmelzen von Eisen findet überwiegend in koksbeheizten Kupolöfen statt. Sie werden ähnlich wie die Hochöfen nach dem Gegenstromprinzip betrieben und sind sehr rohstoff- und energieintensiv. Nach Angaben des Bundesverbandes der Deutschen Gießerei-Industrie (BDG) verbrauchen die deutschen Gießereien etwa 0,45 Mio. t Gießereikoks pro Jahr und produzieren damit 1,5 Mio. t CO<sub>2</sub> [1]. Koks, der aus Steinkohle gewonnen wird, zählt zu den nicht-erneuerbaren Energieformen und steht somit im Fokus der Klimapolitik der Bundesregierung. Die Verdrängung des Kupolofens durch den Induktionsofen ist mittelfristig nicht abzusehen, nicht zuletzt wegen der hohen Investitionskosten. Dem ständig steigenden Strompreis steht der seit 2005 schwankende Kokspreis gegenüber, wobei sich die Nachfrage nach Gießereikoks in Deutschland in den letzten 20 Jahren jedoch kaum verringert hat.

Kupolöfen sind in jeder Gießerei die mit Abstand größten Energieumwandler, sodass sie primäre Zielobjekte in Hinblick auf Effizienzsteigerungen und die Energieoptimierung darstellen. Wegen der hochkomplexen Vorgänge im Kupolofen beruhen alle Entwicklungen des Verfahrens vorwiegend auf empirisch erhobenen Maßnahmen. Die bisher entwickelten Kupolofenmodelle sind oft nur null- oder eindimensional und verwenden poröse Medien als Modell für die Schüttung ([33], [90] bis [101], [103]). Um eindeutige Rückschlüsse aus den Ergebnissen für eine technische Verbesserung des Aggregats zu ziehen, sind sie deshalb für das System oft zu vereinfacht dargestellt. Das lokale Geschehen in Düsenhöhe und in der Verbrennungszone kann deshalb nicht realitätsnah abgebildet werden.

In den vergangenen zehn Jahren ist ein deutlicher Zuwachs der Entwicklung und Anwendung mathematischer Modelle in der Verfahrenstechnik festgestellt worden. Diese Entwicklung ist zum einen auf die wachsende Leistungsfähigkeit der Computer, zum anderen auf die zunehmende Akzeptanz der Simulationsmodelle in der Industrie zurückzuführen. Bestehende Modelle sind weiterentwickelt worden, wobei auch neue Modelle entstanden sind. Beispiele dafür sind einige Turbulenzmodelle in der numerischen Strömungsmechanik, kurz CFD, und der damit verbundenen Berechnung der Wärme- und Stoffübertragung bzw. der chemischen Umsätze, die auf eine immer komplexer werdende Verfahrenstechnik angewendet werden.

Weiterhin ist festzustellen, dass Modelle, die seit langem wegen ihres großen Rechenaufwands als praxisfern galten, immer mehr in den Vordergrund rücken. Dazu zählt die Diskrete-Elemente-Methode, kurz DEM.

Die Erkenntnis des gegenwärtigen Potenzials der Simulation sowie des Bedarfs der Industrie nach Durchleuchtung des Verfahrens haben dazu geführt, die Entwicklung des Kupolofens mit vollständig neuen Ansätzen voranzutreiben. Einer der zentralen Ansätze dieser Arbeit ist die Annahme, dass die Geschwindigkeit der absinkenden



Koksstücke im Vergleich zur Geschwindigkeit des entgegenströmenden Gases vernachlässigbar ist, weshalb die Strömung um die als starr angenommenen Kokspartikel aufgelöst werden kann, ohne deren Bewegung berücksichtigen zu müssen.

## 1.2 Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einen grundlegenden Beitrag zur neuartigen Modellierung sowohl von Kupolöfen als auch von beliebigen Festbettreaktoren im Allgemeinen zu leisten.

Die wesentliche Aufgabe besteht darin, ein belastbares Reaktormodell zu entwickeln, welches folgenden Anforderungen genügt:

- Abbildung der Partikelumströmung sowie der damit verbundenen Turbulenz in einem stationären (eingefahrenen) Betrieb mithilfe der numerischen Strömungsmechanik (CFD). Es soll ein Abbild des Zeitpunktes entstehen, der den stationären Zustand des Ofens darstellt.
- Berücksichtigung entscheidender Reaktionsmechanismen sowie thermischer Vorgänge des Ofens. Hierbei übernimmt der Umsatz des Kokes eine wichtige Rolle.
- Eine Erweiterbarkeit des Modells um weitere Mechanismen bzw. Transportvorgänge soll stets gegeben sein, um die Fortführung der Entwicklung des Modells zu ermöglichen.
- Verwendung einer detaillierten und realitätsnahen Festbettgeometrie. Mithilfe der Diskrete-Elemente-Methode (DEM) soll die Lage der Partikel im stationären Betrieb des Reaktors abgeschätzt werden.
- Des Weiteren ist das Modell zu validieren. Durch einen Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den zahlreichen Messergebnissen aus der Literatur sollen die Anwendbarkeit auf Kupolöfen nachgewiesen sowie die Schwächen des Modells beleuchtet werden.

Nach einer erfolgreichen Validierung des Modells sind im Rahmen einer Parameterstudie Einflüsse wichtiger Betriebsparameter zu untersuchen. Das Ergebnis dieser Studie soll darüber Aufschluss geben, wie das System auf Änderungen bestimmter Randbedingungen reagiert und wie es zu optimieren ist.



## 2 Stand des Wissens

### 2.1 Der Kupolofen

Der Kupolofen ist ein im Gegenstromprinzip betriebener, koksbeheizter Schachtofen, der zur Erschmelzung von Roheisen und Schrott für die Herstellung von Gusseisen eingesetzt wird.

Die ersten Kupolöfen wurden bereits einige Jahrhunderte vor Christus im heutigen China gebaut und zum Einschmelzen des Roheiseins aus dem Hochofen verwendet [2]. Den Namen hat das Aggregat aus dem Lateinischen. Er ist von dem Begriff *cupa* abgeleitet, was so viel wie *das Fass* bedeutet [3]. Tatsächlich wurden teilweise Fässer mit feuerfesten Materialien wie Lehm ausgekleidet (Abbildung 2.1 links) und als Schachtföfen für die Metalleinschmelzung eingesetzt. Beispiele für andere Bauweisen lieferten die damals seit längerer Zeit bekannten Hoch- und Rennöfen. Als Brennstoff wurde bis Mitte des 18. Jahrhunderts überwiegend Holzkohle eingesetzt [4].

Nachdem es A. Darby 1709 erfolgreich gelang, Koks für das Einschmelzen des Eisens in einem Hochofen einzusetzen, wurde der Kupolofen revolutioniert [5]. Dass man durch das Erhitzen der Kohle unter Luftabschluss einen besonders reinen Brennstoff herstellen konnte, war bereits zu diesem Zeitpunkt bekannt [6]. Aufgrund der festeren Struktur des Kokes konnten nun sowohl Hochofen als auch Kupolöfen deutlich größer gebaut werden.

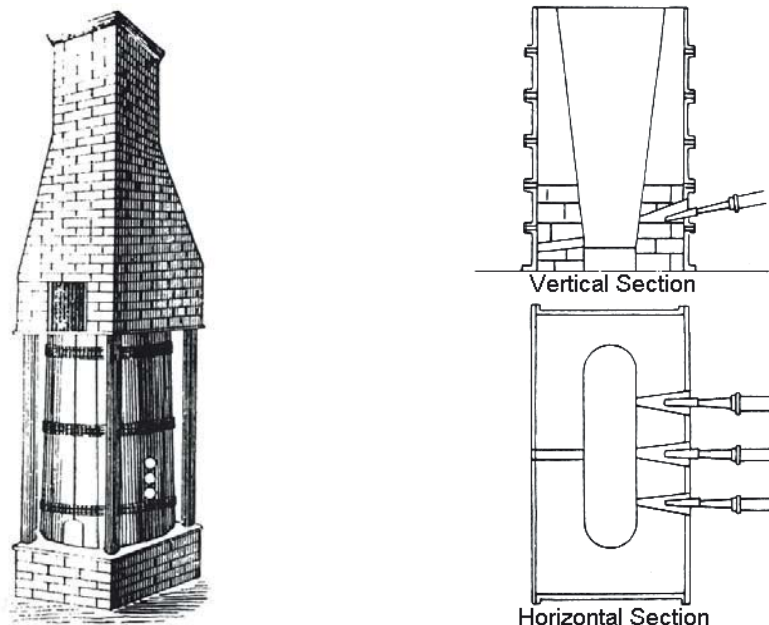


Abbildung 2.1: Historische Kupolöfen [3]. Links: Kupolofen aus Fassdauben nach altem Stil, rechts: Schnitt- und Draufsicht einer Eisen-Einschmelzeinheit nach John Wilkinson.



Als der Engländer John Wilkinson 1794 eine verbesserte Bauweise für den Hochofen patentieren ließ, war ihm noch nicht bewusst, dass er damit ein damals modernes Aggregat für das Erschmelzen von Eisen geschaffen hat [4] (Abbildung 2.1 rechts). Heute gilt dieses Aggregat für viele als der erste Kupolofen überhaupt und John Wilkinson als sein Erfinder [7].

Nach dem einfachen Gegenstromprinzip arbeitend, ist der Kupolofen mit dem für die Roheisenherstellung eingesetzten Hochofen nah verwandt. Die eingesetzten stückförmigen Materialien passieren kontinuierlich den Schacht des Ofens. Der im unteren Bereich des Ofens eingeblasene Luftsauerstoff führt zur Verbrennung des Kokes und zum Aufsteigen der Verbrennungsgase nach dem Prinzip des Kamins. Durch die hohe Temperatur der aufsteigenden Gase werden die metallischen Einsätze (Eisen, Schrott) zum Schmelzen gebracht. Die Eisenschmelze durchsickert wiederum den Ofen, sammelt sich an dessen Boden an, wo sie schließlich abgeführt wird. In Abbildung 2.2 ist das Prinzip des Schachtofens durch eine Schnittskizze und die dazugehörigen Gas- und Temperaturverläufe verdeutlicht.

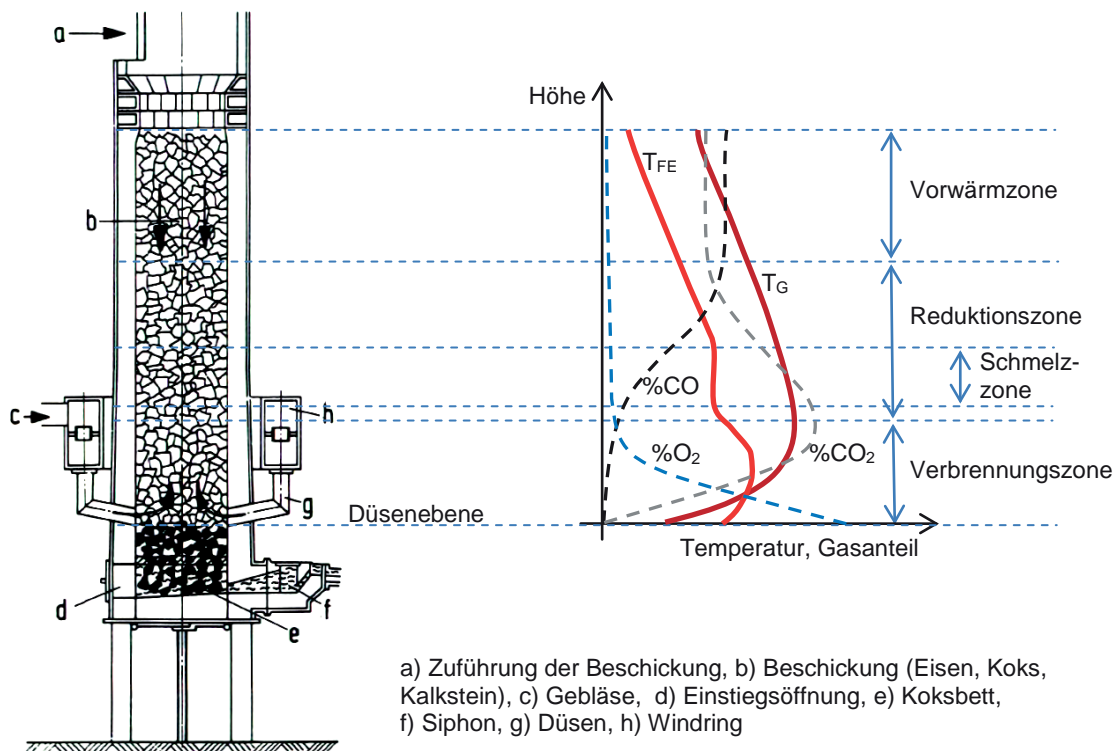
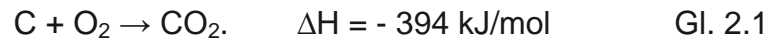


Abbildung 2.2: Prinzip des Kupolofens. Links: Skizze eines Schnitts durch den Kupolofen [8], rechts: prinzipielle Verläufe der prozentualen Gaszusammensetzung (gestrichelt), der Gastemperatur  $T_G$  und der Eisentemperatur  $T_{FE}$

Koks, meist 10 bis 13 % der eingesetzten Metallmasse, hat bei diesem Schmelzverfahren gleich mehrere Aufgaben. Er dient als Energiequelle, als Aufkohlungsmittel sowie als tragende Säule der Schüttung. Als Energielieferant ist der Koks für die



Verbrennungsreaktion zwischen dem darin enthaltenen Kohlenstoff und dem Luftsauerstoff verantwortlich. Die Summengleichung dieser Reaktion lautet:



Aufgrund dieser Reaktion wird der Luftsauerstoff verbraucht und die Temperatur des Gases erhöht. Gleichzeitig steigt der Gehalt des Kohlendioxids an. Die Ausdehnung der Verbrennungszone wird durch den Mangel an Sauerstoff zur Erfüllung der Gleichung 2.1 begrenzt. Die Grenze wird als die Lage des maximalen Kohlendioxidgehaltes definiert. Innerhalb der Verbrennungszone liegt das geschmolzene Eisen bereits tropfenförmig vor, sickert durch das Koksbedt nach unten durch und wird durch den direkten Kontakt zu Koks-kohlenstoff aufgekohlt.

Oberhalb der Verbrennungszone durchströmt das kohlendioxidreiche Gas die Schüttung, wobei es beim Kontakt mit Koks zu einer weiteren heterogenen Reaktion, der Reduktionsreaktion, kommt:



Dieses Phänomen, nach dem Franzosen O. L. Boudouard (1872–1923) benannt, ist eine endotherme Reaktion und wegen des resultierenden Wärme- und Koksverbrauchs im Kupolofen höchst unerwünscht. Der ähnliche Verlauf der Gastemperatur zu dem des Kohlendioxidgehalts über der Ofenhöhe ist nicht zuletzt auf diesen Effekt zurückzuführen (Abbildung 2.2). Zahlreiche Messungen (z. B. [9] bis [11]) belegen, dass das CO<sub>2</sub>-Maximum sich mit dem Maximum der Gastemperatur deckt bzw. dem sehr nahe liegt. Die Ausdehnung der Reduktionszone ist wiederum dadurch begrenzt, dass nicht genügend Wärme zur Verfügung steht, um den Reaktionsablauf nach Gleichung 2.2 zu ermöglichen.

Die angrenzende Vorwärmzone ist vor allem dadurch gekennzeichnet, dass dort keine weiteren Reaktionen zwischen Gas und Koks ablaufen und die nach unten absinkende Schüttung durch die nach oben steigenden Gase getrocknet und vorgewärmt wird.

Bei dem aus dem Ofen austretenden Gas, dem Gichtgas, handelt es sich um ein Gasgemisch, das sich vorwiegend aus Stickstoff, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid zusammensetzt. Geringe prozentuale Anteile von Sauerstoff, Wasserdampf und Wasserstoff sind ebenfalls enthalten. Um die Wirksamkeit der Verbrennung des Kokes zu beurteilen, wird oft das Verbrennungsverhältnis

$$\eta_V = \frac{\% \text{CO}_2}{\% \text{CO}_2 + \% \text{CO}} * 100 [\%] \quad \text{Gl. 2.3}$$

der Abgase herangezogen. Diese Kennzahl ist stets einfach zu ermitteln und liegt bei einem modernen Kupolofen zwischen 30 und 50 % [12] maximal jedoch bei 70 % [8]. Bei der Ermittlung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes ist zu beachten, dass der im Abgas gemessene Wert von dem für die Gleichung 2.3 benötigten Wert abweicht. Der Grund dafür ist die Bildung des CO<sub>2</sub> in der Vorwärmzone durch die Zersetzung des Kalksteins nach



Die Zugabemenge des Kalksteins im Kupolofen beträgt etwa 2 % der metallischen Einsatzstoffe und dient der Verflüssigung der Schlacke. Bestehend fast ausschließlich aus  $\text{CaCO}_3$ , ist der Kalkstein bzw. seine Zersetzung nach Gleichung 2.4 in der Wärmebilanz eines schmelzenden Kupolofens aufzuführen.

Das Brennungsverhältnis gibt zusammen mit den Eingangsgrößen, wie der Windmenge und dem Kokssatz, neben dem Abgasverhältnis weitere wertvolle Informationen über den Ofenbetrieb preis. So kann anhand der Stöchiometrie der Gleichungen 2.1 und 2.2 sowie der idealen Gasgleichung folgende Beziehung für den Koksverbrauch hergeleitet werden:

$$\dot{m}_K = \frac{2 \cdot \dot{V}_{n,O_2,Wind}}{\frac{22,4(100+\eta_V)}{12} \cdot \frac{\%C_{Koks}}{100}} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]. \quad \text{Gl. 2.5}$$

Hierbei sind  $\dot{V}_{n,O_2,Wind}$  der Normvolumenstrom des Sauerstoffs im Wind im  $\text{m}^3/\text{s}$  und  $\%C_{Koks}$  der prozentuale, massenbezogene Kohlenstoffgehalt im Koks.

An der Gleichung 2.5 ist zu erkennen, dass sich bei Erhöhung des Windvolumenstroms der Koksverbrauch vergrößert, und wenn die Boudouard-Reaktion unterbunden wird ( $\eta_V = 100\%$ ) gleichzeitig der Koksverbrauch sinkt.

Durch die Kenntnis des Kokssatzes, also der Menge des eingesetzten Kokses zu der des Metalls, kann mit der Gleichung 2.5 ebenso die Schmelzleistung des Ofens berechnet werden. Sie berücksichtigt jedoch nicht den im Gichtgas in geringen Mengen verbliebenen Sauerstoff und den Sauerstoff, der für andere Oxidationen als für Kohlenstoff verbraucht wurde. Bei Kenntnis der Abbrände durch chemische Analysen der Ein- und Ausgangsstoffe kann die Gleichung 2.5 um diese Beträge korrigiert werden [8], [13]. Da Koks unverhältnismäßig den meisten Sauerstoff verbraucht, ist der Fehler durch die fehlende Korrektur eher gering.

Nach der Gleichung 2.5 führt die Erhöhung der Windmenge linear zur Erhöhung des Koksverbrauchs und demnach zur Steigerung der Schmelzleistung. Allerdings ist neben der Schmelzleistung auch die Eisentemperatur eine wichtige Größe, die ab einer bestimmten spezifischen Windmenge zum Nachteil des Gießverhaltens sinkt. Wie W. Patterson und F. Neumann in [14] durch Versuche ermittelt haben, existiert ein absolutes Maximum der Eisentemperatur bei einer spezifischen Windmenge um  $105 \text{ m}^3_n/(\text{m}^2\text{min})$  (Normvolumenstrom bezogen auf den Ofenquerschnitt in der Düsenenebene). Diese Windmenge ist auch die optimale für den Gießereibetrieb. Der Betriebsbereich mit geringeren Windmengen als diese wird als „Unterblasbereich“ und der mit höheren als „Überblasbereich“ bezeichnet [13], (Abbildung 2.3, links).

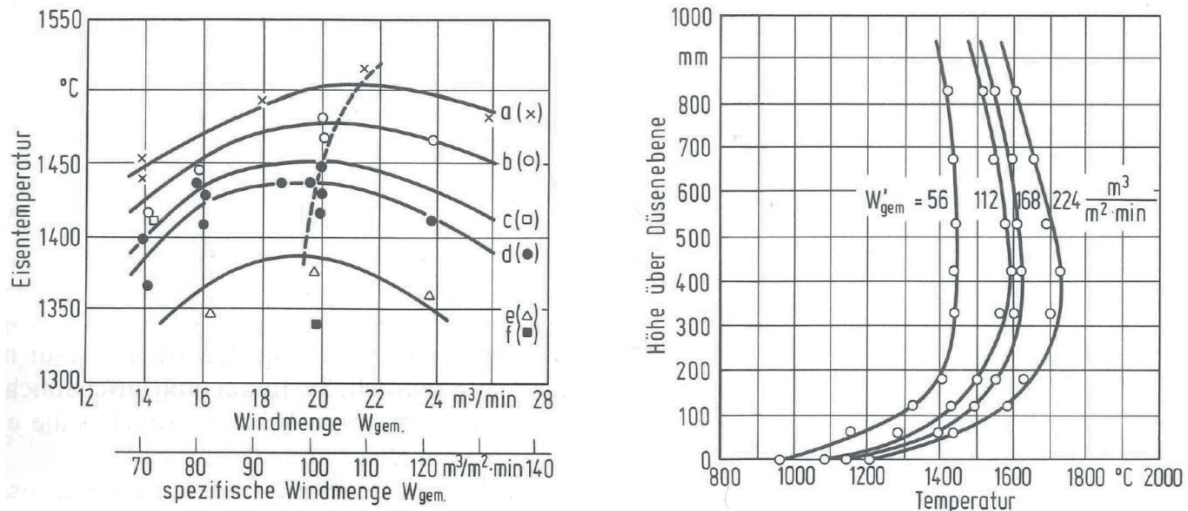


Abbildung 2.3: Einfluss der Windmenge. Links: Einfluss auf die Eisentemperatur mit Kohlenstoffangebot als Parameter (a: 16,5 %, b: 14,0 %, c: 11,0 %, d: 9,5 %, e: 7,5 %, f: 6,5 %) [14], rechts: Einfluss auf die Gastemperatur bei koksgefüllten Ofen, bei einer Koksantenlänge von 80 mm [15]

H. Jungbluth und H. Korschan in [16] sowie W. Preen in [17] haben einfache Zusammenhänge anhand der konvektiven Wärmeübertragungszahl in Schüttungen dargelegt, um eine Erklärung für die Steigung der Eisentemperatur zu liefern. Bei doppelter Windmenge wird nach Gleichung 2.5 die doppelte Koks menge verbrannt und es steht idealerweise die doppelte Energiemenge (Abbildung 2.3, rechts) bei halber Durchlaufzeit zur Verfügung. Würde sich sonst nichts ändern, so wäre die doppelte Energiemenge durch die halbe Durchlauf- und Kontaktzeit kompensiert, d. h. die Summe der übertragenen Wärmemengen würde sich nicht ändern. Jedoch steigen mit der Windmenge auch die Turbulenz im Gas und somit erhöht sich auch die Wärmeübertragungszahl, was wiederum die Summe der übertragenen Wärmemenge erhöht.

W. Preen nennt aber in [17] die Steigerung des Verbrennungsverhältnisses  $\eta_v$  als eine weitere mögliche Ursache. Mit der Erhöhung der Windmenge nimmt der  $CO_2$ -Volumenstrom zu und die für die heterogene Reaktion wichtige Verweilzeit des Gases im Ofen ab. Demzufolge wird ein kleinerer Prozentteil des Kohlendioxids in Kohlenmonoxid und somit weniger fühlbare Wärme in latente Wärme umgewandelt, die wiederum für die Erwärmung des Eisens zur Verfügung steht. In [13] wird allerdings angemerkt, dass die Erklärung nicht allein darauf zurückzuführen ist.

Eine andere Erklärung ist die Vergrößerung der Verbrennungszone durch zusätzlichen Wind [18]. Die Folge ist die Erhöhung der Berührungsstrecke der Eisentropfen mit dem glühenden Koks. Dies ist die analoge Erklärung wie die mittels der Erhöhung der Wärmeübertragungszahl, bezieht sich aber auf eine andere Zone. Das Ergebnis einer Untersuchung von E. Piwowarsky und K. Krämer [15] zeigte jedoch, dass die Höhe der Verbrennungszone sich mit der zunehmenden Windmenge nicht ändert.





Auch neuere Untersuchungen an koksgefüllten Öfen von A. B. Draper [10] und I. J. Petrovski [11] geben keine eindeutige Antwort auf diese Fragestellung.

W. Patterson et al. haben nach der Bilanzierung der Wärme eines Kupolofens nachgewiesen, dass der wahre Grund für den Anstieg der Eisentemperatur eine Mischung der obengenannten Vermutungen ist, wobei die Speicherverluste durch die Ofenwände mit steigender Windmenge deutlich sinken und somit ein Minimum aller Wärmeverluste bei der optimalen Windmenge verursachen [19], [20]. Weiterhin wird in [20] (auf S. 2) von der Schwierigkeit während der Messung der Speicherverluste berichtet.

Aus diesen Tatsachen ergeben sich für den Kupolofen je nach Koksmenge mehr oder minder optimale Betriebspunkte, die sich in einem gemeinsamen Diagramm, dem Jungbluth-Netzdiagramm, darstellen lassen (Abbildung 2.4).

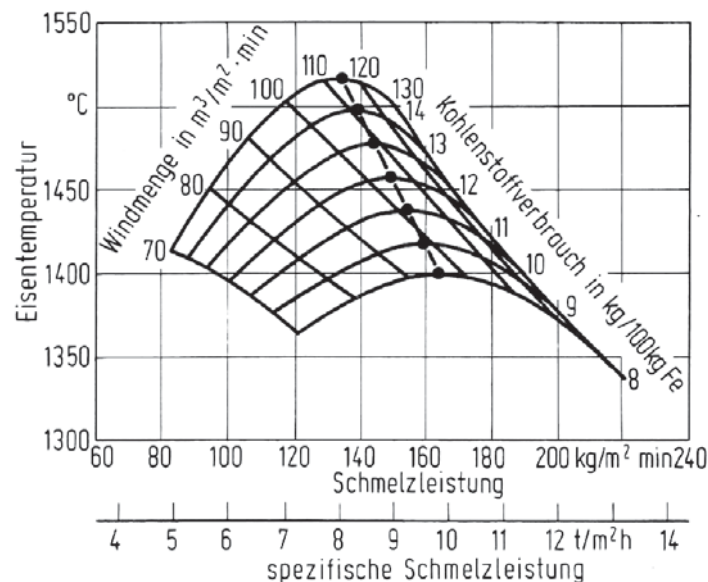


Abbildung 2.4: Jungbluth-Netzdiagramm [8]. Eisentemperatur als Funktion der Schmelzleistung, Windmenge und des Kokssatzes

Das Netzdiagramm ist nicht allgemein gültig und daher für jeden Kupolofen gesondert anzufertigen. Es hat eher einen didaktischen Wert [13], denn in der Praxis gilt, dass nur ein bestimmter Windmengenbereich einzuhalten ist, um möglichst wirtschaftlich zu schmelzen. Dieser wird vom Anlagenbauer vorgegeben und je nach Anlagenauslastung eingestellt.

In der vorangegangenen Erläuterung der Zusammenhänge wurde auch die Rolle des Kokssatzes indirekt mitberücksichtigt. Die Steigerung des Kokssatzes vermindert die Schmelzleistung wegen des dann geringeren Volumenanteils des Eisens im Ofen und erhöht die Eisentemperatur, da bei gleichbleibender Windmenge die gleiche



Wärmemenge auf weniger Eisen aufgeteilt wird (Abbildung 2.4). Aufgrund der Erhöhung der Reaktionsoberfläche führt die Steigerung des Kokssatzes gleichzeitig zu etwas intensiveren Koksreaktionen, sowohl mit dem Sauerstoff als auch die mit dem Kohlendioxid. K. Krämer fand anhand von Messungen der Gastemperatur heraus, dass der Kokssatz keinen Einfluss auf die Höhe der Verbrennungszone hat ([15] oder [21] sowie Abbildung 2.5, links). Das Verbrennungsverhältnis wird jedoch durch mehr Koks vermindert [16], [22].

Neben dem Kokssatz sind die Eigenschaften des Kokses von enormer Wichtigkeit für den Prozess. So hat der Einsatz von feinkörnigem Koks einen ähnlichen Einfluss wie der oben beschriebene Einfluss eines erhöhten Kokssatzes, nur intensiver (Abbildung 2.5, rechts). In [13] wird festgehalten, dass sich Koksstückgröße von allen Kokeigenschaften am stärksten auswirkt. Neben der Erhöhung der Reaktionsoberfläche wird der Gasstrom stärker vermischt. Somit intensiviert sich die Berührung zwischen den Reaktionspartnern Koks und Sauerstoff innerhalb der Verbrennungszone, was zu einer heftigeren Reaktion führt. In Abbildung 2.5 (rechts) ist der Einfluss der Koksstückgröße auf die Gastemperatur im Kupolofen dargestellt.

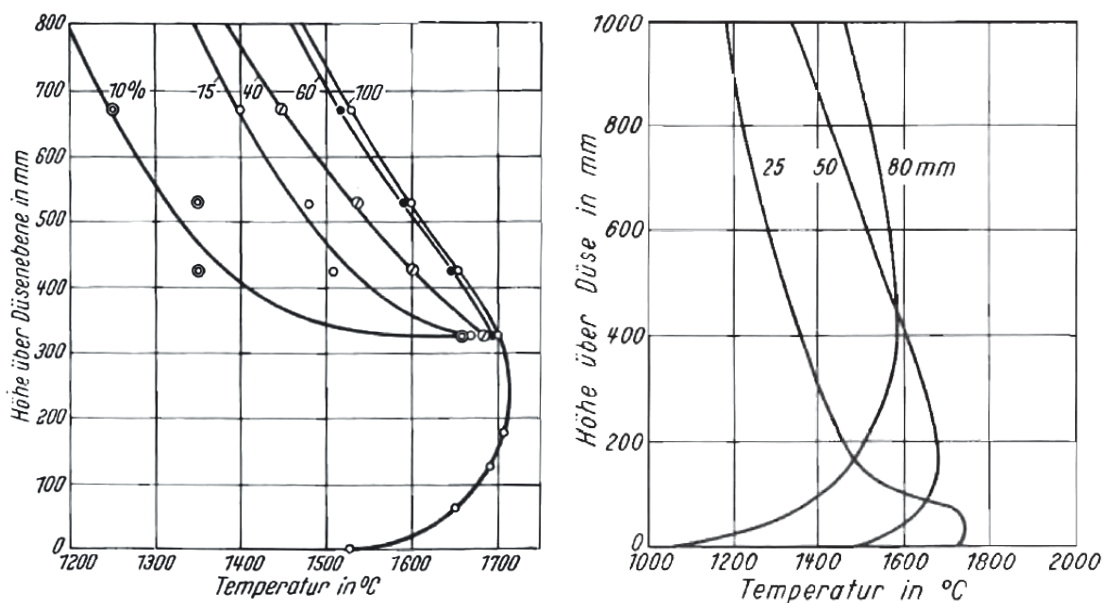


Abbildung 2.5: Links: Einfluss des steigenden Kokssatzes auf die Temperatur am Rand des Ofens [15], rechts: Einfluss der Koksstückgröße auf die Gastemperatur im Kupolofen [21]

Die Verhältnisse können ebenso aus Sicht der Strömungsmechanik anhand der Erhöhung des Stofftransportes zwischen Koks und Gas erklärt werden. Denn spätestens nach den Arbeiten von H. Schenk et al. [23], W. Patterson et al. [24] und W. Koppe [25] ist bekannt, dass bei üblichen Bedingungen des Ofens die Verbrennungsreaktion dadurch bestimmt ist, welche Menge des Sauerstoffs und Kohlendioxids durch die gasdynamische Grenzschicht der Koksfläche ausgetauscht



werden können. Nach dem ersten Fick'schen Gesetz hängt die ausgetauschte Stoffmenge  $\dot{n}$  durch die Grenzschicht bezogen auf das Ofenvolumen  $V$  nach

$$\frac{\dot{n}}{V} = D \cdot \frac{A}{V} \cdot \frac{\Delta c}{\delta} \left[ \frac{\text{mol}}{\text{m}^3 \text{s}} \right] \quad \text{Gl. 2.6}$$

vom Diffusionskoeffizienten  $D$ , der Koksoberfläche pro Ofenvolumen  $A/V$ , dem Sauerstoff-Konzentrationsunterschied zwischen Gasraum und Koksoberfläche  $\Delta c$  und der Grenzschichtdicke  $\delta$  ab. Die Grenzschichtdicke

$$\delta = C \frac{d_p}{\sqrt{Re_p}} \text{ [m]} \quad \text{Gl. 2.7}$$

ist wiederum eine Funktion der Partikel-Reynolds-Zahl  $Re_p$  und des umströmten Partikeldurchmessers  $d_p$ , also die Koksstückgröße, wobei  $C$  als eine Konstante mit dem Wert 1,13 angegeben wird [26].

Da die Partikel-Reynolds-Zahl  $Re_p$  selbst linear von der Größe des Partikels abhängt, geht der Partikeldurchmesser  $d$  allein durch die Verkleinerung der Grenzschicht mit  $1/\sqrt{d}$  in die Gleichung 2.6 ein. Dieser Einfluss erhöht den ohnehin schon großen Einfluss der spezifischen Partikeloberfläche  $A/V$ , die selbst mit  $d$  im Nenner in die Berechnung eingeht.

Auch wenn für die Boudouard-Reaktion andere Gesetzmäßigkeiten gelten als für die Verbrennungsreaktion [27], ist es der Abbildung 2.5 (rechts) aufgrund des steileren Temperaturabfalls (oberhalb des Maximums) zu entnehmen, dass die  $\text{CO}_2$ -Reduktion durch die Koksverkleinerung ebenso intensiv abläuft. Exakt das gleiche Verhalten haben auch Untersuchungen von I. J. Petrovski [11] ergeben. In [13] wird geschlussfolgert, dass eine intensive Verbrennung wegen des Erreichens einer höheren Gastemperatur und somit einer höheren Reduktionsgeschwindigkeit eine ebenso intensive Reduktion zur Folge hat. Als Resultat kleinerer Koksstücke werden in [28] ein kleineres Verbrennungsverhältnis und eine Verminderung der Eisen-temperatur festgestellt.

Einen weiteren wichtigen Einfluss des Koksdurchmessers stellt die Gasdurchlässigkeit der Schüttung dar. Die Gasströmung folgt stets dem Weg des geringsten Widerstands und durchdringt die Schüttung aus kleineren Koksstücken nur mit erhöhtem Druckverlust, was die Gasströmung vermehrt in Richtung der Ofenwand verschiebt. Grund dafür ist die geringere Packungsdichte an der Wand, da das Ineinandergreifen der Partikel durch diese unterbrochen wird. Dieser Effekt ist spätestens seit den Arbeiten von R. Jeschar (z. B. [29]) bekannt und wurde in der neueren Zeit mithilfe numerischer Strömungsberechnung in Zusammenhang mit anderen Reaktoren genauer untersucht (z. B. [30], [31] oder [32]). Abbildung 2.6 zeigt den über den Querschnitt ungleichmäßigen Geschwindigkeitsverlauf in einem mit Kugeln gefüllten Rohr.