



**Möglichkeiten zur Bewertung des
Energieeinsatzes bei der Elektrostahlerzeugung
in Lichtbogenöfen mit Schrottvorwärmung in einem
Schacht und Nachverbrennung der Abgase**

Bericht zum Forschungsvorhaben

**„Entwicklung eines Doppelschachtofens zur umweltscho-
nenden und energiesparenden Elektrostahlerzeugung“,**

als Gemeinschaftsprojekt zwischen Fa. Fuchs Systemtechnik GmbH,
Willstätt-Legelshurst, und dem
Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik der TU Clausthal,
Clausthal-Zellerfeld.

Antragsteller: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Rudolf Jeschar,
Geschäftsführender Leiter des Instituts für
Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik
der TU Clausthal

AKZ: 01549

0 Inhalt

<i>1 Einleitung und Problemstellung</i>	3
<i>2 Beschreibung des Prozeßablaufes</i>	5
2.1 Einzelschachtofen	5
2.2 Doppelschachtofen	7
<i>3 Massen- und Energiebilanzen aus Meßergebnissen</i>	8
<i>4 Bilanzierung und Bewertung der Komponenten Schacht und Nachbrennkammer bei variierenden Randbedingungen</i>	11
<i>5 Modellrechnungen zum Energieeinsatz bei verschiedenen Anlagenvarianten mit den Komponenten Ofengefäß, Schacht und Nachbrennkammer</i>	16
5.1 Definition verschiedener Anlagenvarianten	16
5.2 Beschreibung des Prozeßablaufes in den einzelnen Komponenten	18
5.2.1 Ofengefäß	18
5.2.2 Schacht	26
5.2.3 Nachbrennkammer	29
5.3 Ergebnisse der Modellrechnungen	30
<i>6 Bewertung des Energieeinsatzes für verschiedene Anlagenvarianten</i>	37
<i>7 Zusammenfassung und Ausblick</i>	40
<i>8 Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen, Formelzeichen und Indizes</i>	42
<i>9 Literaturverzeichnis</i>	44

1 Einleitung und Problemstellung

Zur Minderung des Energieeinsatzes bei der Elektrostahlerzeugung wird neben verschiedenen Maßnahmen, wie z.B. die Sauerstoffblastechnik, der Einsatz von Zusatzbrennern, die CO-Nachverbrennung [1-7], auch die sensible Energie der Ofenabgase zur Schrottvorwärmung genutzt. Hierdurch wird insbesondere der Verbrauch an elektrischer Schmelzenergie reduziert, die Einschmelzzeit verkürzt und der Elektrodenverbrauch vermindert [8].

Bei der Nutzung der Ofenabgase zur Schrottvorwärmung stehen verschiedene Verfahren zur Auswahl, z.B. [9-24], von denen seit Anfang der 90er Jahre die Schrottvorwärmung in einem Schacht die größte wirtschaftliche Bedeutung erlangt hat [25]. In diesem Zusammenhang sind verschiedene Varianten von Einzelschachtofen zu nennen (z.B. [19,20]), die aus einem Ofengefäß zum Einschmelzen des Schrotts und einem darüber angeordneten Schacht zur Schrottvorwärmung bestehen, über den die Ofenabgase abgesaugt werden. Zur Erhöhung der Produktionsleistung, insbesondere durch Verkürzung von Prozeßnebenzeiten wie z.B. Chargierzeiten, sind darauf aufbauend Doppelschachtofen (z.B. [22,24]) entwickelt worden, die aus zwei Einzelschachtofen aufgebaut sind. Zwischen den beiden Ofengefäßen besteht eine Verbindung, über die das Abgas des ersten Ofens zur Vorwärmung des Schrotts im Schacht des zweiten Ofens abgesaugt werden kann (**Bild 1**). Die beiden Einzelschachtofen einer Doppelschachtofenanlage, werden mit einer schwenkbaren Elektrodeneinheit (Drehstromelektroden) alternierend betrieben.

Die ovalförmigen Ofengefäße bestehen jeweils aus einem Unterofen (Herd) zur Aufnahme der Schmelze und der Schlacke und einem darüber angeordneten Oberofen. Der Unterofen (Herd) ist mit feuerfestem Material ausgekleidet. Im Herdboden befindet sich eine exzentrisch angeordnete Abstichöffnung (EBT = eccentric bottom tapping), durch die Schmelze diskontinuierlich und schlackenfrei abgestochen wird [26,27]. Der Oberofen ist mit wassergekühlten Wandelementen (Kühlkästen und Rohrkonstruktionen) und einer wassergekühlten Arbeitstür (Ofentür) versehen, die zum Einführen einer Kombilanze für die Zufuhr von Sauerstoff und Kohlenstoff (staubförmig), wie auch zum Messen der Schmelztemperatur, zum Entnehmen von Schmelzproben und zum Abschlacken geöffnet wird. In der Gefäßwand des Oberofens sind zur Vermeidung von „cold spots“ sechs Erdgas-Sauerstoff-Brenner (Gefäßbrenner) installiert, von denen sich vier im Bereich unter dem Schacht und jeweils einer in der Ofentür und über der Abstichvorrichtung befinden. Die Ofengefäße werden durch Deckel geschlossen, die mit dem Schacht fest verbunden sind. Der äußere Ring der Deckel ist jeweils wassergekühlt (Rohrkonstruktion). Im Innern befinden sich die Elektrodendurchführungen, die zur Vermeidung von elektrischen Überschlügen mit Feuerfestmaterial isoliert sind. Die Schächte bestehen aus wassergekühlten Rohrkonstruktionen, an deren oberen Ende jeweils der Übergangskanal als Anschluß an den fest installierten Abgaskanal folgt. Zur Abdichtung zwischen Übergangs- und Abgaskanal, die beide ebenfalls wassergekühlt sind, dient eine flexible Manschette. Deckel, Schacht und Übergangskanal bilden jeweils den beweglichen Ofenteil, der für die Schrottaufgabe in das Ofengefäß angehoben und zur Seite geschwenkt wird. Der Schrott kann auch über den Schacht aufgegeben werden, der hierfür mit einem Schrottaufgabetrichter und einem Schieber, der während des Chargierens geöffnet wird, ausgerüstet ist.

Bei der Abgasführung wird zwischen der Primärabsaugung und der Sekundärabsaugung (Hallenabsaugung) unterschieden. Die Primärabsaugung erfaßt über die beiden Abgaskanäle

das Abgas aus den Öfen, wobei der jeweils abgesaugte Abgasvolumenstrom und damit der Unterdruck im Ofengefäß über die Regelklappe im Abgaskanal gesteuert wird. Die Sekundär- oder Hallenabsaugung erfasst die Hallenabluf und damit auch Ofenabgase, die nicht durch die Primärabsaugung erfasst werden, wobei der über die Sekundärabsaugung erfasste Volumenstrom in der Regel etwa das Zehnfache des über die Primärabsaugung abgesaugten Abgasvolumenstromes beträgt.

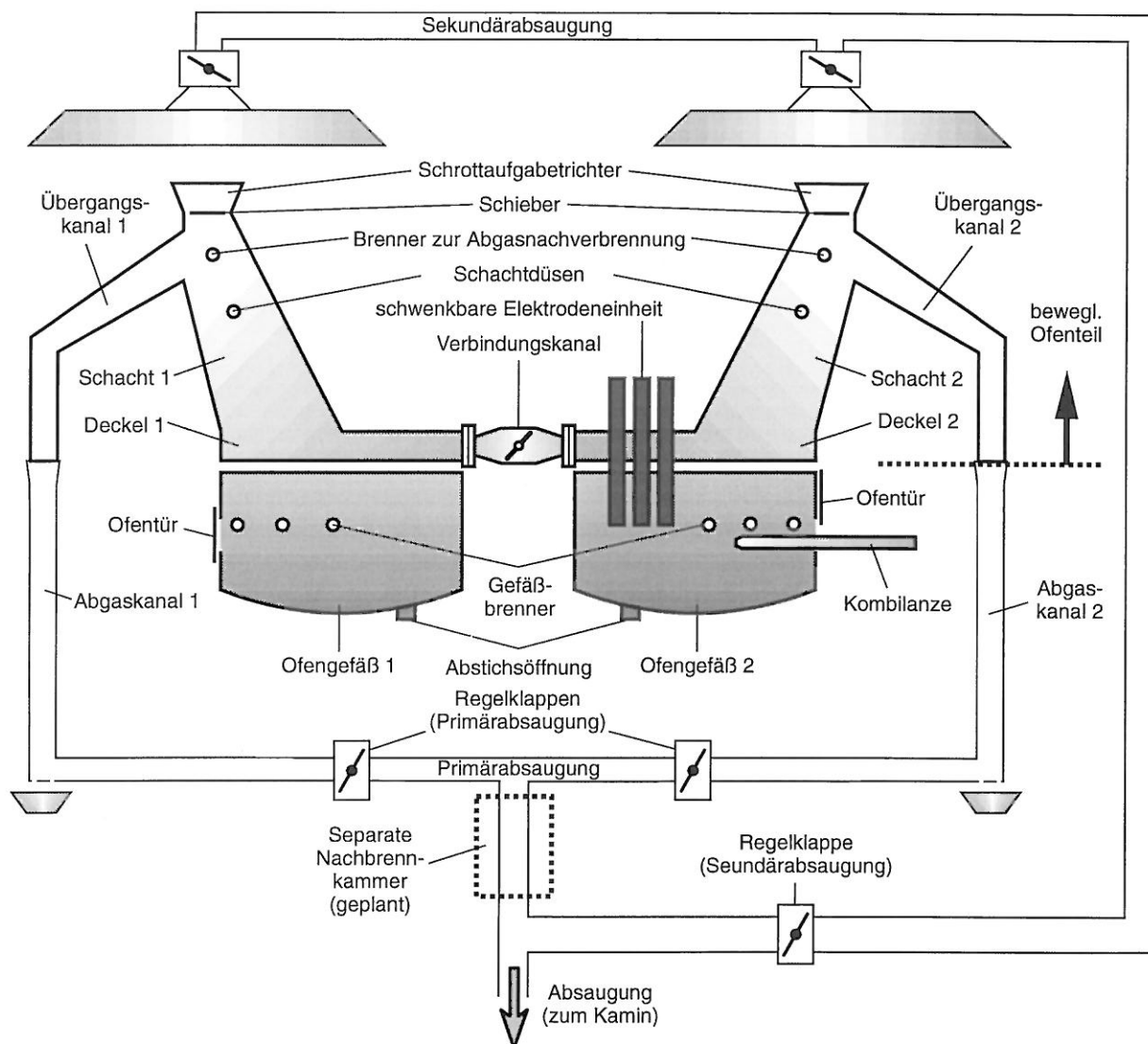


Bild 1: Aufbau einer aus zwei Einzelschachtofen bestehenden Doppelschachtofenanlage.

Die Schrottvorwärmung im Schacht hat teilweise relativ niedrige Abgastemperaturen zur Folge, bei denen Schadstoffe wie Kohlenwasserstoffe (VOC = Volatile Organic Compounds) und Kohlenmonoxid (CO), die durch Vergasungs- und Verdampfungsreaktionen der Verunreinigungen im Schrott (Öle, Fette, Kunststoffe etc.) freigesetzt werden, im nachgeschalteten Abgassystem nur unzureichend verbrennen. Zur Minderung von Schadstoffemissionen und damit zur Einhaltung bestimmter Umweltauflagen (Emissionsgrenzwerte) sollte das Abgas daher nach Austritt aus dem Schacht einer thermischen Nachbehandlung (Nachverbrennung) unterzogen werden. Am Schachtaustritt sind daher Brenner zur Abgasnachverbrennung

(Erdgas-Luft-Brenner) installiert. Zudem besteht auch die Möglichkeit, die thermische Nachbehandlung der Abgase durch Zufuhr von Sauerstoff über Schachtdüsen zu unterstützen.

Die Nachverbrennung der Abgas kann jedoch nicht nur am Schachtaustritt, sondern auch in einer separaten hinter dem Schacht angeordneten Brennkammer erfolgen, die in Bild 1 gestrichelt eingezeichnet ist.

Durch die Schrottvorwärmung, die zur Einsparung von elektrischer Schmelzenergie führt, ist somit wiederum ein zusätzlicher Energieaufwand für die Nachverbrennung der Abgase erforderlich. Vor diesem Hintergrund wird in dem vorliegenden Beitrag aufgezeigt, ob durch Schrottvorwärmung im Schacht trotz eines zusätzlichen Energieaufwands für eine thermische Nachbehandlung (Nachverbrennung) der Schachtabgase insgesamt Energie bei der Elektrostahlerzeugung eingespart werden kann.

2 Beschreibung des Prozeßablaufes

2.1 Einzelschachtofen

Zur Beschreibung des Prozeßablaufes im Einzelschachtofen können während einer Schmelze verschiedene Zeitabschnitte bzw. Prozeßphasen (**Bild 2**)

- die inaktive Phase (IP),
- die Schmelzphase (SP),
- die Überhitzungs- bzw. Feinungsphase (ÜP),
- die Abstichphase (AP) und
- die Leerphase (LP)

unterschieden werden. Diese Einteilung in Prozeßphasen, die jedoch kein allgemeingültiges Konzept zur Prozeßbeschreibung darstellen soll, wurde hierbei aus praktischen Gesichtspunkten vorgenommen, um einzelne Prozeßeingriffe in den zeitlichen Ablauf des gesamten Stahlerzeugungsvorganges einzuordnen. Hierauf wird im folgenden eingegangen, wobei zur Verdeutlichung von Größenordnungen beispielhaft Zahlenwerte angegeben werden, die u.a. auch im Rahmen der Modellrechnungen (in Kapitel 5) als Randbedingungen benutzt werden.

Der Prozeß beginnt mit der **inaktiven Phase**, die den Zeitabschnitt von der Aufgabe der ersten Schrottcharge zur Zeit t_{IP} bis zur Aufnahme des Schmelzbetriebs durch Zufuhr von elektrischer Energie zum Zeitpunkt t_{SP} umfaßt (z.B. $(t_{SP} - t_{IP}) \approx 20$ bis 30 min).

Abhängig von der Art der Schrottaufgabe und der Zeit, zu der Schmelzbetrieb durch Zufuhr von elektrischer Energie begonnen wird, lassen sich für den Einzelschachtofen verschiedene Chargierweisen unterscheiden. Wesentlich in diesem Zusammenhang ist der sogenannte „3-Chargen-Schachtschmelzbetrieb“, bei dem die gesamte Schrottmasse, die für eine Schmelze erforderlich ist (z.B. $m_{Sch} \approx 105000$ kg), zu Beginn chargiert wird. In Bild 2 sind für diese Chargierweise die Prozeßphasen und die wesentlichen Prozeßeingriffe über der Zeit dargestellt. Die 1. Charge (z.B. $m_{Sch,1} \approx 63000$ kg) wird hierbei direkt in das Ofengefäß aufgegeben. Im Anschluß daran werden die 2. und die 3. Charge (z.B. $m_{Sch,2} \approx 21000$ kg und $m_{Sch,3} \approx 21000$ kg) in den Schacht gefüllt. Nach der Aufgabe der 2. Schrottcharge wird mit der Vorwärmung des chargierten Schrotts durch Zufuhr von Energie über die Erdgas-Sauerstoff-Brenner (Gefäßbrenner) begonnen, die mit einer thermischen Leistung von $P_{th,GB} = 16$ MW

betrieben werden. Zur thermischen Nachbehandlung der Schachtabgase sind hierbei die Brenner am Schachtaustritt mit einer thermischen Leistung von $P_{th,SB} = 5 \text{ MW}$ in der Regel während der gesamten inaktiven Phase und darüber hinaus in Betrieb.

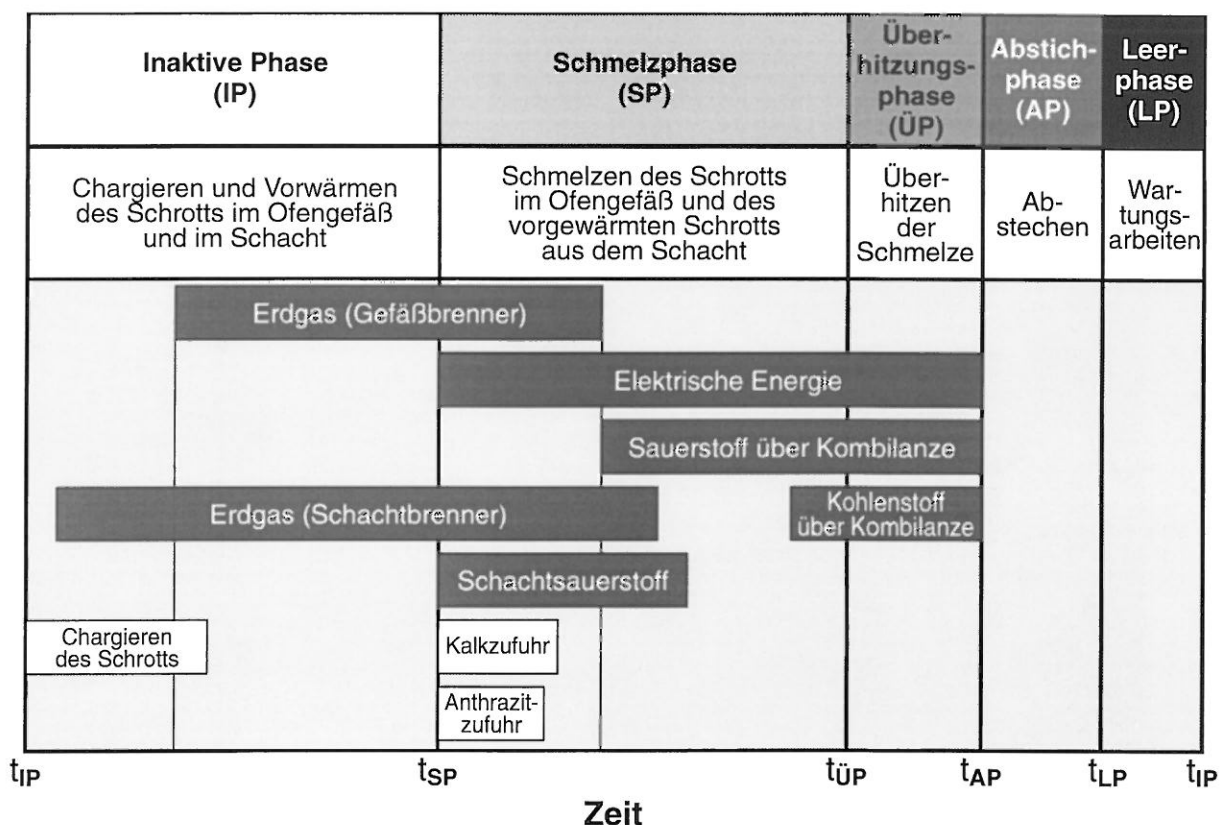


Bild 2: Prozeßphasen und wesentliche Prozeßeingriffe bei „3-Chargen-Schachtschmelzbetrieb“.

In der sich anschließenden **Schmelzphase** wird zur Zeit t_{SP} mit der Zuführung der elektrischen Energie zum Einschmelzen des Schrotts im Ofengefäß begonnen. Die Wirkleistung liegt hierbei zu Beginn der Schmelzphase zwischen $P_{el} = 50$ und 55 MW und wird im weiteren Verlauf bis auf $P_{el} = 60 \text{ MW}$ erhöht. Zur Unterstützung des Einschmelzvorganges und zur Leistungssteigerung wird zusätzlich weiterhin Energie über die Gefäßbrenner ($P_{th,GB} = 16 \text{ MW}$) zugeführt. Gleichzeitig wird das abgesaugte Ofenabgas zur Schrottvorwärmung im Schacht genutzt.

Zu Beginn der Schmelzphase werden darüber hinaus kontinuierlich Anthrazit (z.B. bis zu $m_{An} = 1000 \text{ kg}$) als Kohlungs- bzw. Reduktionsmittel und Kalk (z.B. bis zu $m_{CaO} = 3000 \text{ kg}$) als Schlackenbildner chargiert. Nach einer bestimmten Zeit - maßgebend hierfür ist in erster Linie der spezifische Erdgasverbrauch - werden die Gefäßbrenner abgeschaltet. Zur Unterstützung des Schmelzvorganges wird dann im weiteren Verlauf Sauerstoff über die Kombilanze, eingeblasen (z.B. $\dot{V}_{O_2,La} = 2500 \text{ m}^3(\text{i.N.})/\text{h}$), wobei ein Teil des Einsatzgutes (Schrott, bzw. Schmelze, unerwünschte Begleitelemente, Anthrazit usw.) oxidiert bzw. „verschlackt“ wird. Gegen Ende der Schmelzphase wird über die Kombilanze zusätzlich Kohlenstoff zugeführt (z.B. $\dot{m}_{C,La} = 2000$ bis 2500 kg/h), um durch dessen Verbrennungsabgase die Schlacke aufzu-

schäumen. Durch diese Schaumslaggen-Fahrweise [28,29], bei der die Energieübertragung vom Lichtbogen an die Schmelze verbessert wird, kann nahezu bis zum Abstich mit unverminderter elektrischer Leistung gearbeitet werden, da die Lichtbögen weitgehend von Schlacke umhüllt und somit die feuerfeste Ofenausmauerung und die Wandkühlelemente vor der intensiven Lichtbogenstrahlung geschützt sind [30]. Die Schmelzphase endet zur Zeit $t_{\dot{U}P}$ und umfaßt eine Dauer von $(t_{\dot{U}P} - t_{SP}) = 25$ bis 30 min.

Nachdem der gesamte Schrott eingeschmolzen ist, beginnt zur Zeit $t_{\dot{U}P}$ die **Überhitzungs-** bzw. **Feinungsphase**, in der die Schmelze durch Zufuhr von elektrischer Energie auf Abstichtemperatur (z.B. $\vartheta_{Iup} = 1650$ bis 1660°C) überhitzt wird. Zusätzlich werden Sauerstoff zur Oxidation des in der Schmelze gelösten Kohlenstoffes und damit zur Einstellung der gewünschten Schmelzzusammensetzung am Prozeßende und Kohlenstoff zum Schäumen der Schlacke (s.o.) über die Kombilanze zugeführt. Die Schlacke läuft dabei kontinuierlich über die Ofentür ab. Die Überhitzungsphase dauert etwa $(t_{AP} - t_{\dot{U}P}) = 5$ bis 10 min.

Im Anschluß beginnt zur Zeit t_{AP} die **Abstichphase**, in der die Stahlschmelze über die im Herdboden des Ofengefäßes exzentrisch angeordnete Öffnung abgestochen wird. Hierfür werden Deckel, Schacht und Übergangskanal (beweglicher Ofenteil) angehoben und das Ofengefäß mittels der vorhandenen Kippvorrichtung zur Abstichöffnung geneigt. Die Abstichphase dauert etwa $(t_{LP} - t_{AP}) = 3$ bis 6 min.

Der Zeitabschnitt nach erfolgtem Abstich bis zu Beginn des Chargiervorganges der nachfolgenden Schmelze ($(t_{IP} - t_{LP}) = 5$ bis 10 min) wird als **Leerphase** bezeichnet, in der Wartungsarbeiten am Ofengefäß wie z.B. Reinigung und Füllung des Abstichloches, Instandsetzung der Feuerfestauskleidung usw. durchgeführt werden.

2.2 Doppelschachtofen

Für den Doppelschachtofen läuft der Prozeß im zweiten Einzelschachtofen analog ab. In **Bild 3** ist die Verknüpfung der Prozeßphasen der beiden Öfen dargestellt. Im 2. Ofen beginnt die inaktive Phase während der Schmelzphase des 1. Ofens. Nach dem Chargieren des Schrotts im 2. Ofen kann die Verbindungsklappe zwischen den Öfen geöffnet und das Abgas des 1. Ofens über den 2. Ofen abgesaugt werden. Somit besteht die Möglichkeit, die sensible Energie des Abgases des 1. Ofens, in dem in dieser Zeit der Schrott nahezu vollständig eingeschmolzen ist, zur Vorwärmung des Schrotts im Schacht des 2. Ofens zu nutzen.

Da für diese Maßnahme der Unterdruck im 2. Ofen gegenüber dem des 1. Ofens weiter verringert werden muß, dringt entsprechend mehr Umgebungsluft als Falschluff durch die vorhandenen Öffnungen (zwischen Ofengefäß und Deckel, zwischen Elektroden und Elektrodendurchführungen und zwischen Ofentür und Obergefäß) in den 2. Ofen ein. Durch die zusätzliche Falschluff wird der Schrott im 2. Ofen dann im Vergleich zum Einzelschachtofen weniger vorgewärmt, so daß der Vorteil der Schrottvorwärmung beim Doppelschachtofen entsprechend gemindert wird.

Aus **Bild 3** ist die Verkürzung der „tap-to-tap-time“ des Doppelschachtofens gegenüber der des Einzelschachtofens ersichtlich, die zur Erhöhung der Produktionsleistung führt und damit ein Vorteil des Doppelschachtofens gegenüber dem Einzelschachtofen darstellt.

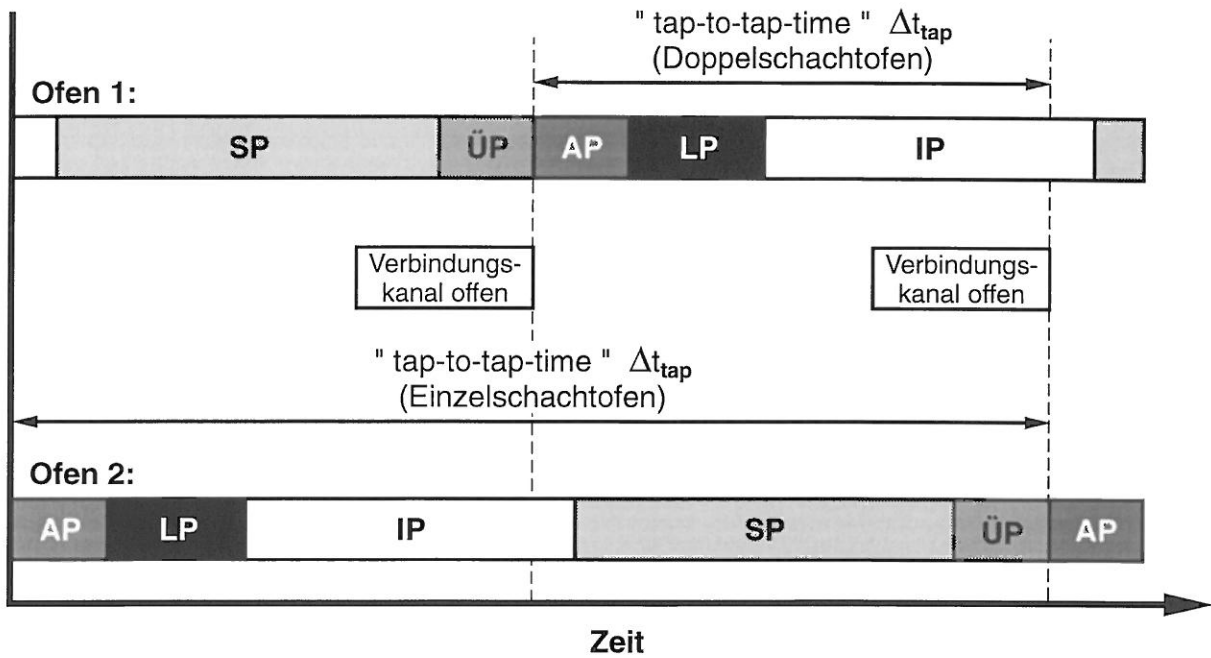


Bild 3: Gegenüberstellung der Prozessphasen für den Doppelschachtofen.

3 Massen- und Energiebilanzen aus Meßergebnissen

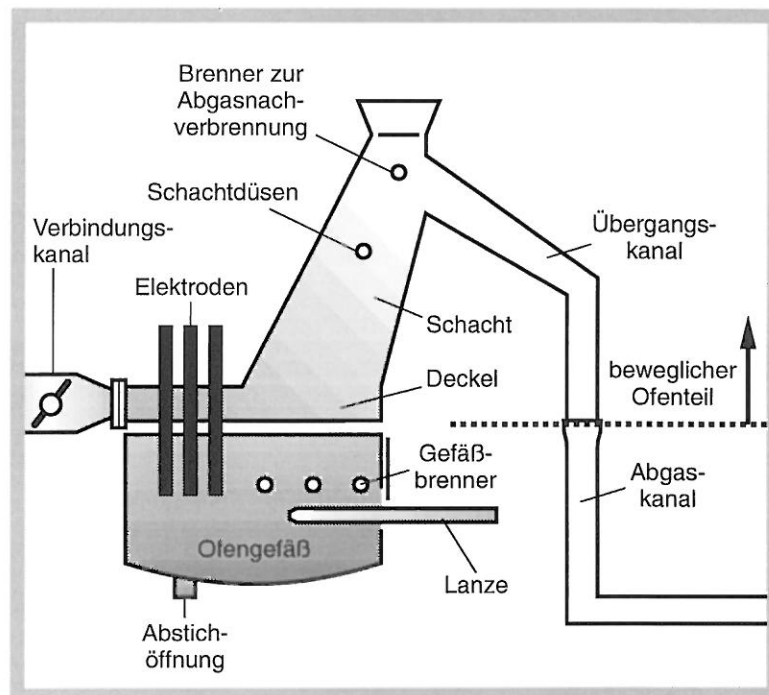


Bild 4: Bilanzgrenze für den Einzelschachtofen zur Erstellung von Massen - und Energiebilanzen.

Für die in **Bild 4** gezeigte Bilanzgrenze eines Einzelschachtofens sind in den **Bildern 5** und **6** jeweils ein Beispiel einer Massen- und einer Energiebilanz für den gesamten Prozeß von Abstich bis Abstich dargestellt, die anhand von experimentellen Ergebnissen erstellt worden sind. Damit wird im Zusammenhang mit den nachfolgenden Überlegungen deutlich, welche der jeweiligen zu- und abgeführten Massen- und Energieströme für den Prozeß wesentlich sind und welche ggf. vernachlässigt werden können.

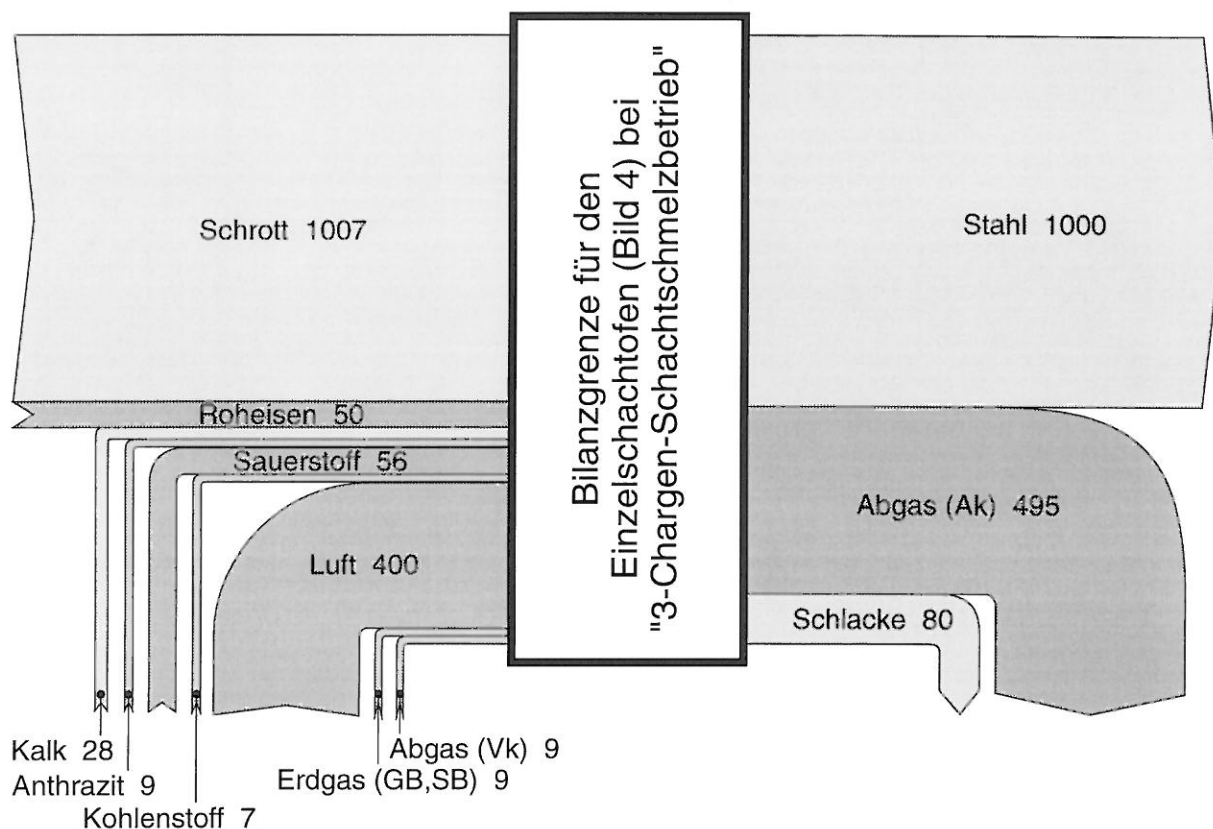


Bild 5: Beispiel einer Massenbilanz für den Einzelschachtofen bei „3-Chargen-Schachtschmelzbetrieb“ für den gesamten Prozeß von Abstich bis Abstich (Zahlenangaben in kg pro 1000 kg Stahl, Erläuterungen im Text).

Zur Erzeugung von 1000 kg Stahl werden die folgenden Massen zugeführt (Bild 5):

- Schrott (1007 kg) und Roheisen (50 kg) als metallischen Einsatz,
- Kalk (28 kg),
- Anthrazit (9 kg),
- Erdgas (6 kg über die Gefäßbrenner und 3 kg über die Schachtbrenner),
- Sauerstoff (22 kg über die Gefäßbrenner, 14 kg über die Lanze und 20 kg über die Schachtdüsen),
- Kohlenstoff (5,5 kg über die Lanze und 1,5 kg über die Elektroden),
- Abgas (9 kg), das über den Verbindungskanal zugeführt wird,
- Luft (46 kg über die Schachtbrenner und 354 kg als Umgebungs- bzw. Falschluff) und

- Kühlwasser (ca. 30000 kg), das nicht unmittelbar am Prozeß beteiligt und aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht mit in Bild 5 eingezeichnet ist.

Abgeführt werden (vgl. Bild 5):

- Stahl (1000 kg),
- Schlacke (80 kg) und
- Abgas (Ak) (495 kg), worin 10 kg Staub enthalten sind.

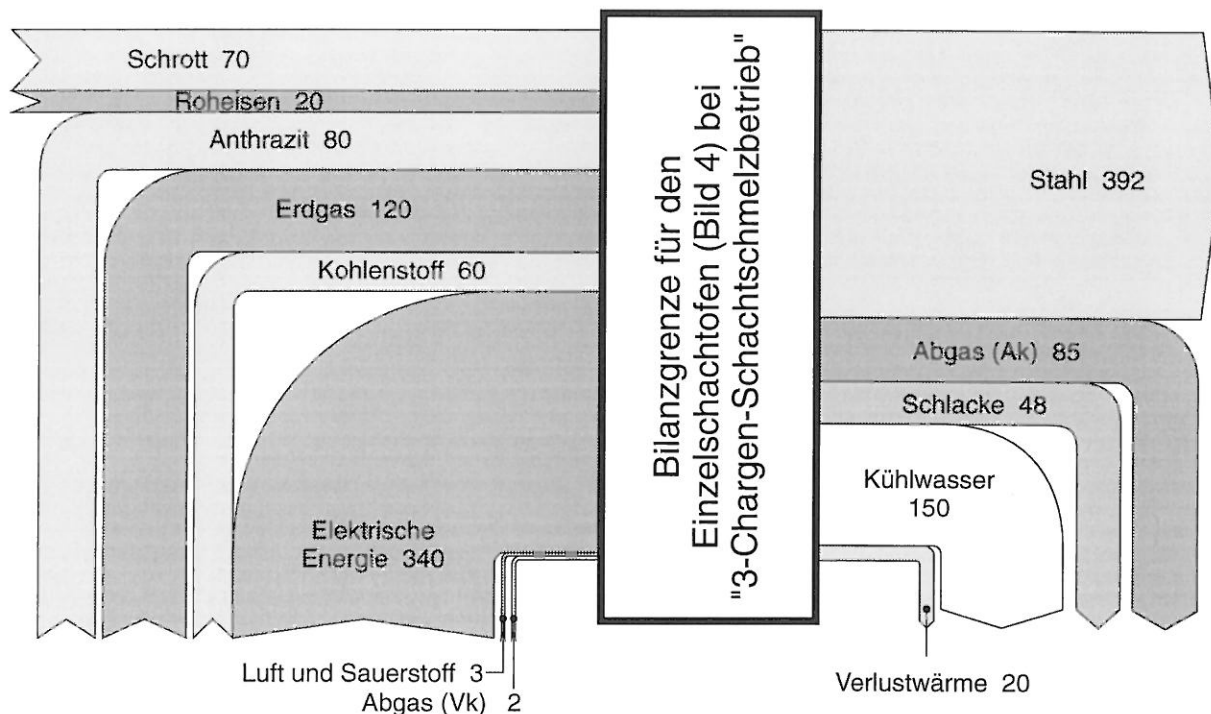


Bild 6: Beispiel einer Energiebilanz für den Einzelschachtofen bei „3-Chargen-Schachtschmelzbetrieb“ für den gesamten Prozeß von Abstich bis Abstich (Zahlenangaben in kWh pro 1000 kg Stahl, Erläuterungen im Text).

Aus der Energiebilanz (Bild 6) ist ersichtlich, daß sich die insgesamt pro 1000 kg Stahl zugeführte Energie zusammensetzt aus:

- elektrischer Energie (340 kWh),
- chemischer Energie (120 kWh) durch Verbrennung von Erdgas,
- chemischer Energie (230 kWh) durch Verbrennung von Ölen und Fetten, die mit dem Schrott eingetragen werden, durch Oxidation von Kohlenstoff und durch Verschlackung von Schrott- und Roheisenbestandteilen (metallurgische Reaktionen) und
- sensibler Energie (5 kWh) von Luft, Sauerstoff und Abgas.

Abgeführt werden:

- die sensible (312 kWh) und latente (80 kWh) Energie der Stahlschmelze,
- die sensible (36 kWh) und latente (12 kWh) Energie der Schlacke,
- die sensible (78 kWh) und latente (7 kWh) Energie des Abgases (Abgaskanal),
- die sensible Energie des Kühlwassers (150 kWh), wobei
 - 25 kWh mit dem Kühlwasser des Ofengefäßes,
 - 15 kWh mit dem Kühlwasser des Deckels,
 - 30 kWh mit dem Kühlwasser des Schachtes,
 - 60 kWh mit dem Kühlwasser des Übergangskanals und
 - 20 kWh mit dem Kühlwasser des Abgaskanals abgeführt werden und
- Verlustwärme (20 kWh) (z.B. Abstrahlverluste).

Zur Bewertung der Energiebilanz eines Lichtbogenofens wird in der Literatur, z.B. in [31-35], der energetische Nutzungsgrad herangezogen, der sich aus dem Quotienten von Nutzenergie und der dem Prozeß in einem bestimmten Zeitabschnitt zugeführten Energie ergibt:

$$\eta_{Nutz} = \frac{\text{Nutzenergie}}{\text{insgesamt zugeführte Energie}} = \frac{E_{Nutz}}{E_{zu}} \quad (1)$$

Als Nutzenergie des Stahlerzeugungsprozesses wird in [31-35] die sensible und latente Energie des Stahls angesehen, die im vorliegenden Beispiel

$$E_{Nutz} = E_{St} = 392 \text{ kWh} / t_{St}$$

beträgt. Die sensible und latente Energie der Schlacke wird „ungenutzt“ nicht als Nutzenergie gewertet [31-34,36]. Mit

$$E_{zu} = 695 \text{ kWh} / t_{St}$$

als der im vorliegenden Beispiel insgesamt dem Prozeß im Zeitabschnitt von Abstich bis Abstich zugeführten Energie, ergibt sich der energetische Wirkungsgrad des Einzelschachtofens zu

$$\eta_{Nutz} = 56\%.$$

4 Bilanzierung und Bewertung der Komponenten Schacht und Nachbrennkammer bei variierenden Randbedingungen

Um beurteilen zu können, ob für die thermische Nachbehandlung der Schachtabgase mehr Energie aufzuwenden ist als durch die Schrottvorwärmung in einem Schacht zurückgewonnen werden kann, wird zunächst die in **Bild 7** dargestellte vereinfachte Energiebilanz der hintereinandergeschalteten Komponenten Schacht und Nachbrennkammer betrachtet. Das aus dem Ofengefäß austretende Abgas wärmt hierbei den Schrott im Schacht vor und wird anschließend thermisch nachbehandelt (nachverbrannt).

Bei Vernachlässigung der Wärmeübertragung an das Kühlwasser des Schachtes wird die Differenz der Enthalpieströme des aus dem Ofengefäß $\dot{H}_{A,O}$ und aus dem Schacht $\dot{H}_{A,S}$ austretenden Abgases zur Schrottvorwärmung im Schacht und dadurch zur Einsparung von elektrischer Schmelzenergie, die im Ofengefäß zugeführt wird, genutzt. Eine Einsparung an Primärenergie infolge Schrottvorwärmung kann damit wie folgt formuliert werden:

$$\Delta \dot{E}_{pr,S} = a \cdot (\dot{H}_{A,O} - \dot{H}_{A,S}) = a \cdot \dot{m}_{A,O} \cdot (c_{A,O} \cdot \vartheta_{A,O} - c_{A,S} \cdot \vartheta_{A,S}). \quad (2)$$

a ist hierbei eine Primärenergiebewertungszahl die folgenden Sachverhalt wiedergibt:

Wird angenommen, daß die eingesparte Energie durch Schrottvorwärmung im Schacht gleich dem Potential an eingesparter Primärenergie ist, dann ist eine Primärenergiebewertungszahl von $a = 1$ anzunehmen.

Wird jedoch zur Erzeugung von elektrischer Energie, die im Ofengefäß zum Einschmelzen zugeführt wird, z.B. ein elektrischer Kraftwerkswirkungsgrad von $\eta_K = 33\%$ berücksichtigt, dann ist die dreifache Menge an Primärenergie zur Erzeugung von elektrischer Energie nötig. In diesem Fall wäre eine Primärenergiebewertungszahl von $a = 3$ anzusetzen.

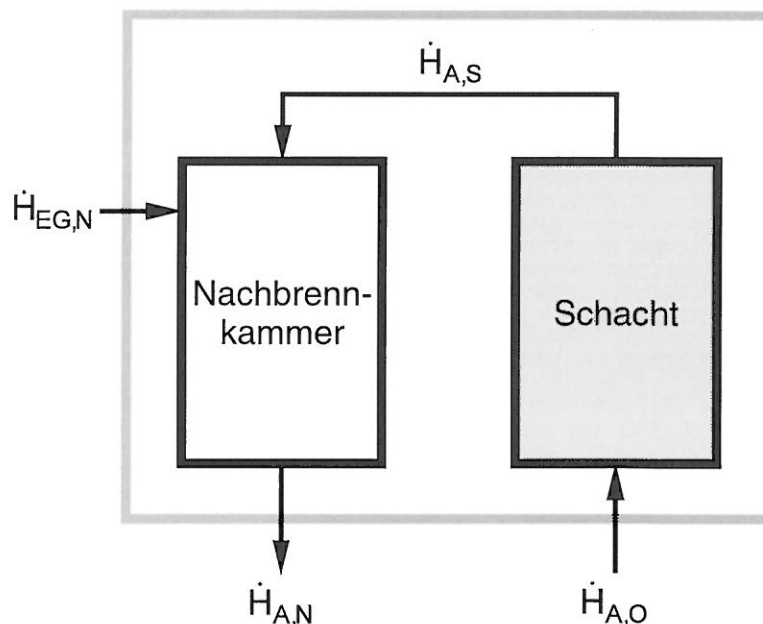


Bild 7: Vereinfachte Energiebilanz für die Komponenten Schacht und Nachbrennkammer.

Der Aufwand an Primärenergie für die thermische Nachbehandlung der Schachtabgase beträgt:

$$\dot{E}_{pr,N} = \dot{H}_{EG,N} = \dot{m}_{EG,N} \cdot h_{u,EG}. \quad (3)$$

Um nun beurteilen zu können, ob die Einsparung an Primärenergie infolge Schrottvorwärmung im Schacht größer ist als der Aufwand an Primärenergie für die thermische Nachbehandlung der Schachtabgase, wird die folgende Bewertungszahl Z_0 definiert:

$$Z_0 = \frac{\Delta \dot{E}_{pr,S}}{\dot{E}_{pr,N}} = \frac{a \cdot \dot{m}_{A,O} \cdot (c_{A,O} \cdot \vartheta_{A,O} - c_{A,S} \cdot \vartheta_{A,S})}{\dot{m}_{EG,N} \cdot h_{u,EG}} \quad (4)$$

Mit der Energiebilanz für die Nachbrennkammer

$$\dot{m}_{A,N} \cdot c_{A,N} \cdot \vartheta_{A,N} = \dot{m}_{A,S} \cdot c_{A,S} \cdot \vartheta_{A,S} + \dot{m}_{EG,N} \cdot h_{u,EG} \quad (5)$$

und dem Abgasmassenstrom der Nachbrennkammer

$$\dot{m}_{A,N} = \dot{m}_{A,S} + \dot{m}_{EG,N} \cdot (1 + l_N \cdot l_{min,EG}) \quad (6)$$

folgt mit

$$\dot{m}_{A,S} = \dot{m}_{A,O} \quad (7)$$

für das Verhältnis von dem aus dem Ofengefäß austretenden Abgasmassenstrom zu dem für die Nachverbrennung erforderlichen Erdgasmassenstrom $\dot{m}_{A,O} / \dot{m}_{EG,N}$

$$\frac{\dot{m}_{A,O}}{\dot{m}_{EG,N}} = \frac{h_{u,EG} - (1 + \lambda_N \cdot l_{min,EG}) \cdot c_{A,N} \cdot \vartheta_{A,N}}{c_{A,N} \cdot \vartheta_{A,N} - c_{A,S} \cdot \vartheta_{A,S}} \quad (8)$$

und damit für die Bewertungszahl Z_0

$$Z_0 = a \cdot \frac{c_{A,O} \cdot \vartheta_{A,O} - c_{A,S} \cdot \vartheta_{A,S}}{c_{A,N} \cdot \vartheta_{A,N} - c_{A,S} \cdot \vartheta_{A,S}} \cdot \frac{h_{u,EG} - (1 + \lambda_N \cdot l_{min,EG}) \cdot c_{A,N} \cdot \vartheta_{A,N}}{h_{u,EG}} \quad (9)$$

In **Bild 8** ist die Bewertungszahl Z_0 in Abhängigkeit von der Temperatur des aus dem Schacht austretenden Abgases $\vartheta_{A,S}$ dargestellt. Das Bild gilt für den Fall, daß das Ofenabgas mit einer Temperatur von $\vartheta_{A,O} = 1000^\circ\text{C}$ in den Schacht eintritt und daß die Nachverbrennung mit Erdgas bei einer Luftzahl von $\lambda_N = 1,1$ erfolgt. Parameter in Bild 8 sind das Temperaturniveau des Abgases in der Nachbrennkammer $\vartheta_{A,N}$ sowie die Primärenergiebewertungszahl a .

Zur Erläuterung von Bild 8 seien im folgenden zwei Beispiele gegeben:

1. Beispiel: Es wird eine Primärenergiebewertungszahl von $a = 1$ und eine Temperatur des aus dem Schacht austretenden Abgases von $\vartheta_{A,S} = 750^\circ\text{C}$ angenommen sowie eine Nachverbrennungstemperatur von $\vartheta_{A,N} = 850^\circ\text{C}$ gefordert. Dann ist dem Bild eine Bewertungszahl von $Z_0 = 1,5$ zu entnehmen.

Dies bedeutet, daß z. B. für 1,5 kWh eingesparte Energie durch Schrottvorwärmung ein Aufwand von 1 kWh Primärenergie für die nachfolgende thermische Behandlung des aus dem Schacht austretenden Abgases erforderlich ist. In diesem Fall ergibt sich eine Energieeinsparung durch Schrottvorwärmung von 0,5 kWh.

2. Beispiel: Wird $a = 1$ und eine Temperatur des Schachtabgases von $\vartheta_{A,S} = 400^\circ\text{C}$ angenommen sowie ebenfalls eine Nachverbrennungstemperatur von $\vartheta_{A,N} = 850^\circ\text{C}$ gefordert, so ist eine Bewertungszahl von $Z_0 = 0,8$ abzulesen. In diesem Fall wird z.B. für 0,8 kWh eingesparte Energie durch Schrottvorwärmung ein Aufwand von 1 kWh Primärenergie für die nachfolgende thermische Behandlung des aus dem Schacht austretenden Abgases erforderlich. Damit ergibt sich keine Energieeinsparung durch Schrottvorwärmung, sondern ein zusätzlicher Energieaufwand von 0,2 kWh.

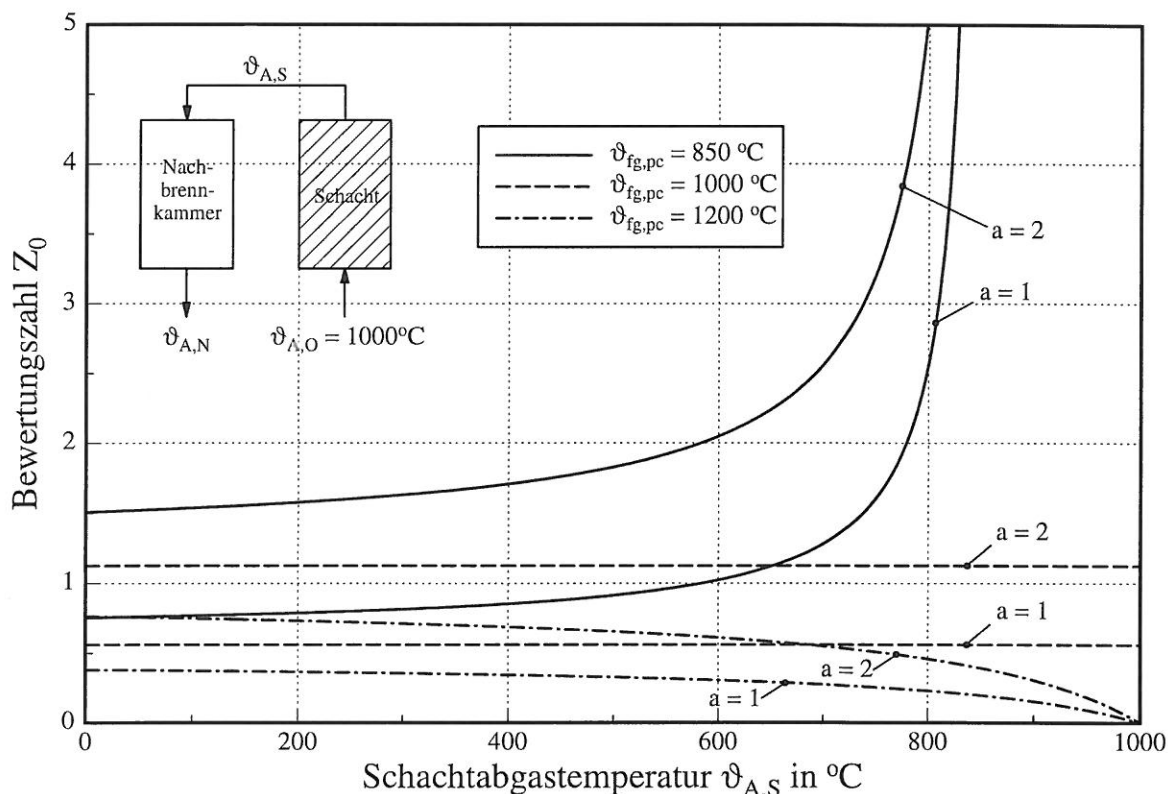


Bild 8: Bewertungszahl Z_0 in Abhängigkeit von der Temperatur des Schachtabgases für eine Ofenabgastemperatur von $\vartheta_{A,O} = 1000^\circ\text{C}$.

$Z_0 < 1$ bedeutet also zusätzlicher Energieaufwand, demgegenüber wird bei $Z_0 > 1$ durch Schrottvorwärmung im Schacht Energie eingespart.

Ist für die Nachverbrennung der Abgase, wie aus Bild 8 weiter zu erkennen, eine Temperatur von $\vartheta_{A,N} = 1000^\circ\text{C}$ oder 1200°C erforderlich, so ergibt sich für $a = 1$ im gesamten untersuchten Bereich keine Energieeinsparung.

Wird jedoch für die Verhältnisse am Lichtbogenofen angenommen, daß die eingesparte Energie durch Schrottvorwärmung im Schacht gleich dem Zweifachen an eingesparter Primärenergie ist ($a = 2$), ist demgegenüber eine deutliche Verbesserung der Verhältnisse zu erkennen. Für Nachverbrennungstemperaturen von $\vartheta_{A,N} = 850^\circ\text{C}$ oder 1000°C ergeben sich im gesamten untersuchten Bereich Einsparungen an Primärenergie.

In **Bild 9** ist der Einfluß der Temperatur des aus dem Ofengefäß austretenden Abgases $\vartheta_{A,O}$ (Bild 8 gilt nur für $\vartheta_{A,O} = 1000^\circ\text{C}$) auf die Bewertungszahl dargestellt, wobei eine Nachverbrennungstemperatur von $\vartheta_{A,N} = 850^\circ\text{C}$ zugrunde liegt. Parameter sind die Temperatur des aus dem Schacht austretenden Abgases $\vartheta_{A,S}$ sowie die Primärenergiebewertungszahl a .

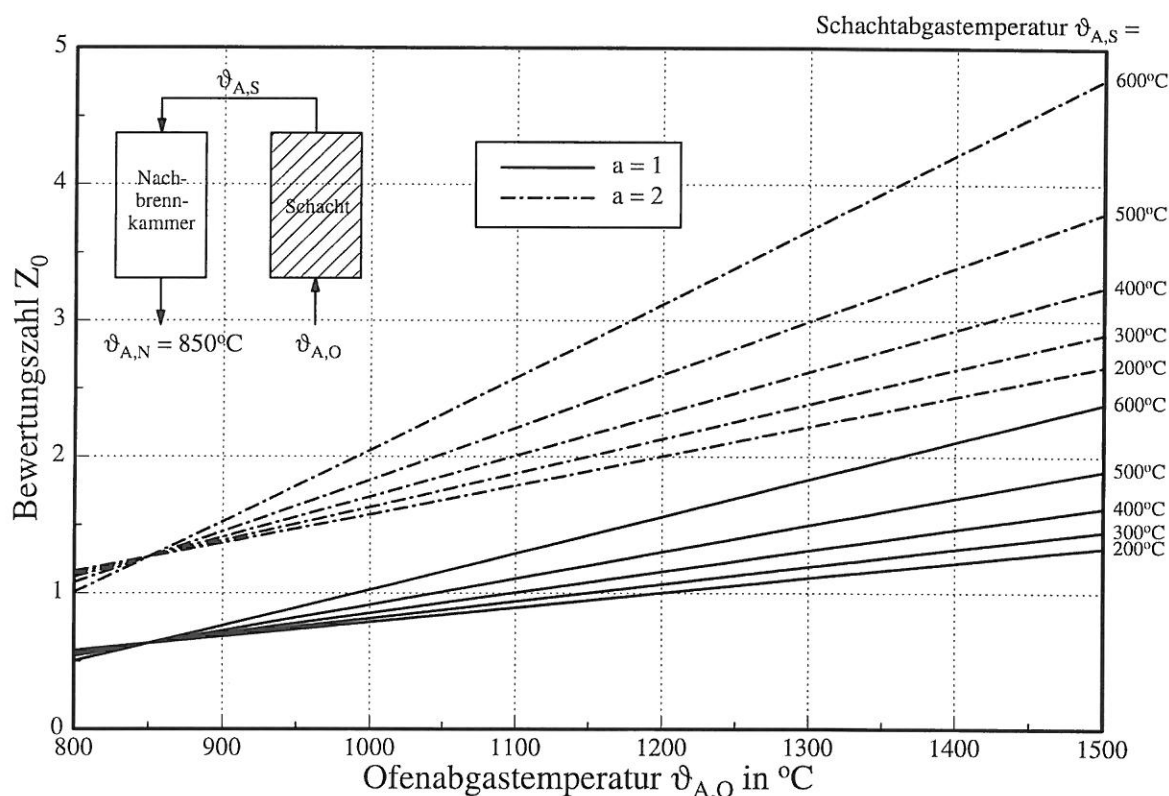


Bild 9: Bewertungszahl Z_0 in Abhängigkeit von der Temperatur des Ofenabgases $\vartheta_{A,O}$.

Aus den Bildern 8 und 9 ist also ersichtlich, daß die Schrottvorwärmung in einem Schacht bei zusätzlichem Energieaufwand für die thermische Nachbehandlung der Schachtabgase grundsätzlich zu einer Energieeinsparung führen kann. Das Ofengefäß ist hierbei über die Vorgabe der Temperatur des austretenden Abgases, d.h. als Randbedingung, mit in die Bewertung einbezogen.

Die o.g. Ausführungen zur Bewertungszahl gelten jedoch nur für jeweils augenblicklich herrschende Temperaturen des aus dem Ofengefäß $\vartheta_{A,O}$ und aus dem Schacht $\vartheta_{A,S}$ austretenden Abgases. Für eine Bewertung des gesamten Zeitabschnitts einer Schmelze wäre eine Integration dieser Abgastemperaturen über der Zeit erforderlich. Eine solche Integration, nur auf die Komponenten Schacht und Nachbrennkammer bezogen, ist jedoch nicht sinnvoll, da durch die Schrottvorwärmung im Schacht - wie bereits einleitend erwähnt - neben anderem auch die Einschmelzzeit verkürzt und somit der Prozeßablauf im Ofengefäß beeinflußt wird. Dies bedeutet, daß zur Ermittlung der insgesamt (integral) während einer Schmelze durch Schrottvorwärmung im Schacht eingesparten Energien auch das Ofengefäß und damit alle Anlagenkomponenten mit in die Betrachtung einzubeziehen sind. Hierauf wird im folgenden Kapitel eingegangen.

5 Modellrechnungen zum Energieeinsatz bei verschiedenen Anlagenvarianten mit den Komponenten Ofengefäß, Schacht und Nachbrennkammer

5.1 Definition verschiedener Anlagenvarianten

Für das Ofengefäß wird zunächst

- eine Variante ohne Schacht (Betriebsweise ohne Schacht (A))

und

- eine Variante mit Schacht (Betriebsweise mit Schacht (B))

festgelegt.

Bei der **Betriebsweise ohne Schacht (A)** wird das abgesaugte Ofenabgas nicht zur Schrottvorwärmung in einem Schacht genutzt und das Ofengefäß quasi als Einzelmodul betrachtet. Diese Betriebsweise wird daher auch als „konventioneller Schmelzbetrieb“ bezeichnet. Hierbei werden zwei Schrottchargen zeitlich hintereinander mit zwischenzeitlichem Schmelzbetrieb in das Ofengefäß aufgegeben, da zu Beginn des Prozesses nicht die gesamte Schrottmenge einer Schmelze chargiert werden kann.

Bei der **Betriebsweise mit Schacht (B)** wird das abgesaugte Ofenabgas zur Schrottvorwärmung im Schacht genutzt und somit die Kombination aus Ofengefäß und Schacht, d.h. der gesamte Einzelschachtofen betrachtet. Diese Betriebsweise wird daher auch als „Schachtschmelzbetrieb“ bezeichnet. Wesentlich in diesem Zusammenhang ist der „Schachtschmelzbetrieb“ bei maximalem Füllstand im Schacht, bei dem das Ofengefäß und der Schacht bereits zu Beginn des Prozesses mit der gesamten Schrottmenge einer Schmelze gefüllt werden (vgl. „3-Chargen-Schachtschmelzbetrieb“ in Kapitel 3). Hierbei kann die größtmögliche Energie des Abgases zur Schrottvorwärmung genutzt werden.

Wird darüber hinaus die Nachbrennkammer zur thermischen Behandlung der Schachtabgase mit in die Betrachtung einbezogen, können für die o.g. Varianten (Betriebsweisen (A) und (B)) die beiden weiteren Unterteilungen mit und ohne Nachbrennkammer getroffen werden. Damit ergeben sich insgesamt die folgenden Anlagenvarianten bzw. Fälle:

1. Fall AoN (Betriebsweise ohne Schacht (A) und ohne Nachbrennkammer):
Ofengefäß als Einzelmodul.
2. Fall AmN (Betriebsweise ohne Schacht (A) und mit Nachbrennkammer):
Kombination aus Ofengefäß und Nachbrennkammer.
3. Fall BoN (Betriebsweise mit Schacht (B) und ohne Nachbrennkammer):
Kombination aus Ofengefäß und Schacht.
4. Fall BmN (Betriebsweise mit Schacht (B) und mit Nachbrennkammer):
Kombination aus Ofengefäß, Schacht und Nachbrennkammer.

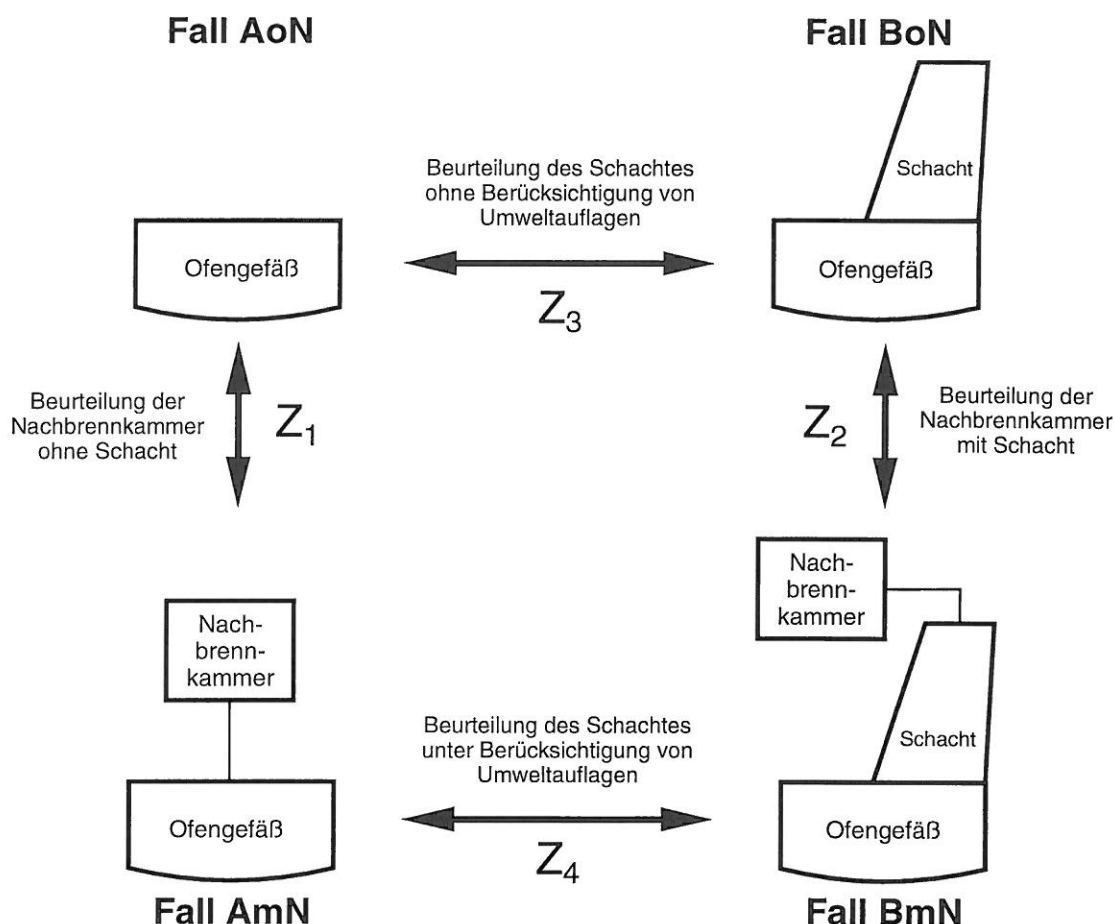


Bild 10: Gegenüberstellung von verschiedenen Anlagenvarianten (Fälle). Der Vergleich der verschiedenen Anlagenvarianten anhand der Bewertungszahlen Z_1 , Z_2 , Z_3 und Z_4 wird in Kapitel 6 vorgenommen.

Mit dieser Fallunterscheidung läßt sich dann anhand einer Gegenüberstellung, wie in **Bild 10** dargestellt, der Energieeinsatz bei verschiedenen Anlagenvarianten des Lichtbogenofens beurteilen:

Werden z.B. die Fälle AoN und BoN miteinander verglichen, so kann die Schrottvorwärmung im Schacht als Maßnahme zur Einsparung von Energie ohne zusätzlichen Energieaufwand für eine thermische Abgasnachbehandlung (Nachbrennkammer) beurteilt werden. Aus diesem Vergleich ergibt sich die maximal mögliche Energieeinsparung durch Schrottvorwärmung in einem Schacht.

Da in den Fällen AmN und BmN jeweils die Nachbrennkammer mit berücksichtigt wird, kann durch einen Vergleich dieser Fälle beurteilt werden, ob die Schrottvorwärmung im Schacht auch bei zusätzlichem Energieaufwand für eine thermische Abgasnachbehandlung insgesamt noch zur Energieeinsparung bei der Elektrostahlerzeugung führt.

Werden die Fälle AoN und AmN sowie die Fälle BoN und BmN gegenübergestellt, so kann der Einfluß der Nachbrennkammer jeweils ohne und mit Schacht beurteilt werden.

Voraussetzung für einen Vergleich der einzelnen Anlagenvarianten (Fälle) und damit für die Bewertung der Energieeinsparung durch Schrottvorwärmung ist die Beschreibung des Prozeßablaufes in den einzelnen Komponenten mittels tragfähiger energetischer Prozeßmodelle,

anhand derer wesentliche Größen (vgl. hierzu Kapitel 3), wie z.B. die an den Schrott im Ofengefäß und im Schacht übertragene Energie, die für die Nachverbrennung der aus dem Ofengefäß bzw. aus dem Schacht austretenden Abgase erforderliche Energie usw. ermittelt werden können. Auf diese Zusammenhänge wird im folgenden Kapitel eingegangen.

5.2 Beschreibung des Prozeßablaufes in den einzelnen Komponenten

5.2.1 Ofengefäß

Zur Beschreibung des Prozeßablaufes im Ofengefäß wird dieser aus Gründen der Zweckmäßigkeit gegenüber der Einteilung in Prozeßphasen (vgl. Kapitel 2.1 bzw. Bild 2) nunmehr in sogenannte Modellphasen eingeteilt. Hierbei wird, wie z.B. in [37] beschrieben, der Ablauf des physikalischen Schmelzvorganges zugrunde gelegt und damit von der vereinfachten Vorstellung ausgegangen, daß der gesamte Schrott, der sich im Ofengefäß befindet, jeweils erst bis auf Schmelztemperatur erwärmt wird, bevor er zu schmelzen beginnt. Der sich anschließende Schmelzvorgang erfolgt dann bei konstanter Temperatur (Schmelztemperatur), wobei die zugeführte Energie als Schmelzenthalpie im Schrott gebunden wird. Für die mathematische Beschreibung des Schmelzvorganges im Ofengefäß wird die gesamte Einschmelzzeit damit in einen Zeitabschnitt für die Erwärmung und in eine Schmelzzeit eingeteilt. Mit diesen Annahmen können für die o.g. Betriebsweisen A und B die folgenden Modellphasen zugrunde gelegt werden (**Bild 11**):

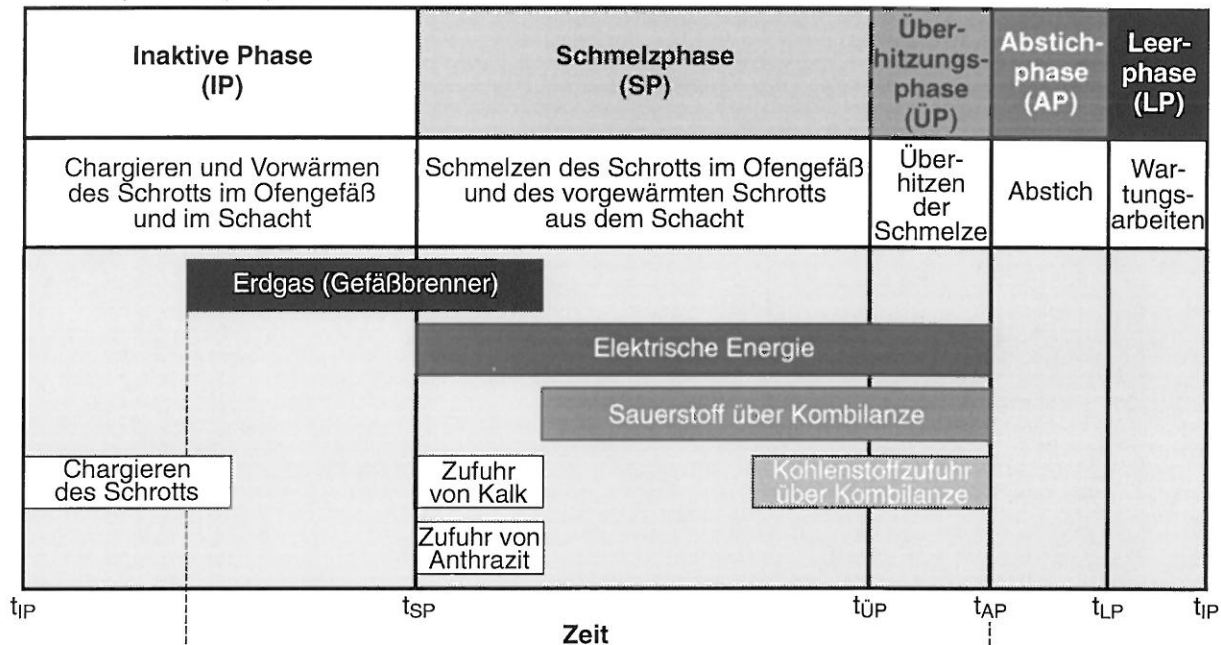
- Modellphase 1 (MP 1): Erwärmen des Schrotts im Ofengefäß bis auf Schmelztemperatur,
- Modellphase 2 (MP 2): Schmelzen des Schrotts im Ofengefäß,
- Modellphase 3 (MP 3): Erwärmen der 2. Schrottcharge (Fall A) bzw. des vorgewärmten Schrotts aus dem Schacht (Fall B) im Ofengefäß bis auf Schmelztemperatur,
- Modellphase 4 (MP 4): Schmelzen der 2. Schrottcharge (Fall A) bzw. des Schrotts aus dem Schacht (Fall B) im Ofengefäß und
- Modellphase 5 (MP 5): Überhitzen der Schmelze im Ofengefäß bis auf Abstichtemperatur.

Bild 11 zeigt weiter eine Gegenüberstellung der zeitlichen Abfolgen von Prozeß- und Modellphasen. Hierbei ist zu erkennen, daß mit der Einteilung des Prozeßablaufes in Modellphasen gegenüber der Einteilung in Prozeßphasen insbesondere das Schmelzen in weitere Teilschritte untergliedert wird. In **Bild 12** sind die zeitlichen Abfolgen der Modellphasen für beide Betriebsweisen Fall A und Fall B gegenübergestellt, die im folgenden näher erläutert werden.

Die **Modellphase 1**, in der der Schrott im Ofengefäß bis auf Schmelztemperatur vorgewärmt wird, beginnt in beiden Fällen jeweils nach dem Chargieren zur Zeit t_{MP1} . Zu dieser Zeit liegt im Fall A (Betriebsweise ohne Schacht) die 1. Schrottcharge im Ofengefäß vor, während im Fall B (Betriebsweise mit Schacht) sowohl das Ofengefäß als auch der Schacht mit Schrott gefüllt sind. Die Schrottmasse im Ofengefäß ist dabei in beiden Fällen gleich groß ist.

Zur Vorwärmung des Schrotts wird in dieser Phase anfangs ausschließlich Energie über Erdgas-Sauerstoff-Brenner (Gefäßbrenner) und im weiteren Verlauf zusätzlich elektrische Energie eingebracht. Nach dem Abschalten der Gefäßbrenner wird in beiden Fällen zusätzlich Sauerstoff und Kohlenstoff zugeführt. Die sensible Enthalpie der Ofenabgase wird im Fall B zur Schrottvorwärmung im Schacht genutzt.

Prozeßphasen (PP):



Modellphasen (MP) für den Fall B (Betriebsweise mit Schacht):

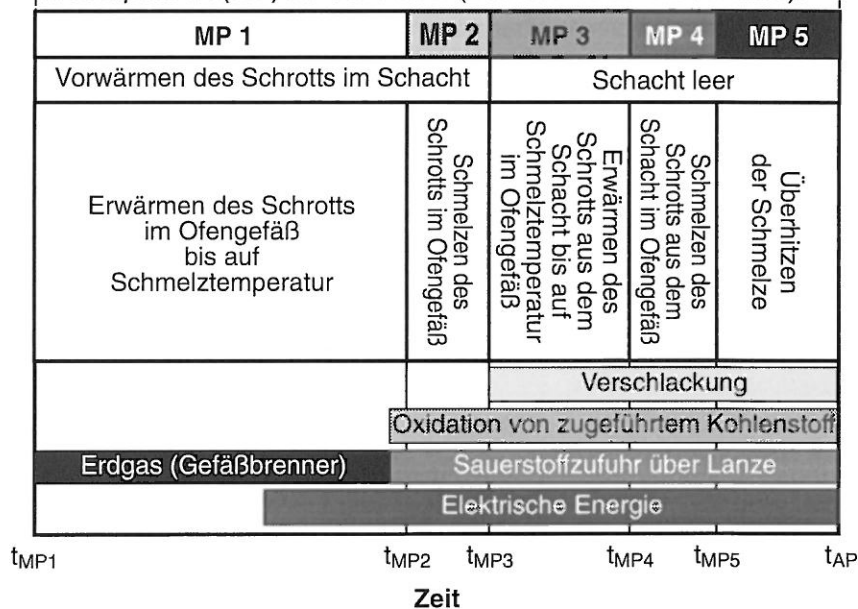
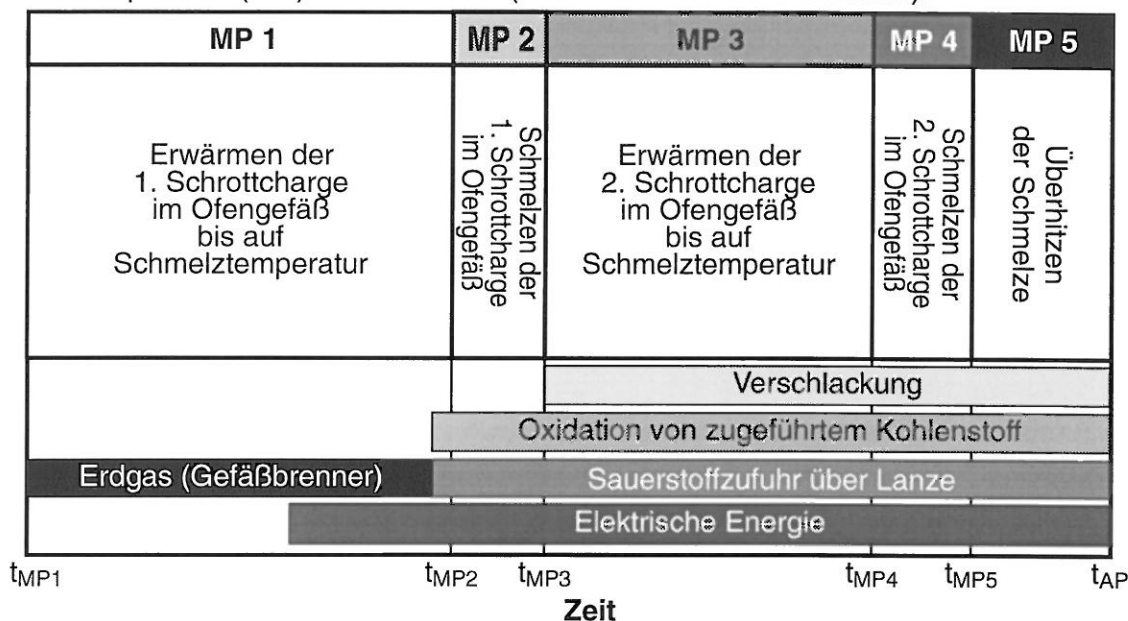


Bild 11: Gegenüberstellung der zeitlichen Abläufe von Prozeß- und Modellphasen.

In der **Modellphase 2**, die in beiden Fällen zur gleichen Zeit t_{MP2} beginnt, wird der Schrott im Ofengefäß durch Zufuhr von elektrischer Energie eingeschmolzen. Zusätzlich wird Energie

durch Oxidation von zugeführtem Kohlenstoff eingebracht. Im Fall B wird das Ofenabgas wiederum zur Vorwärmung des Schrotts im Schacht genutzt.

Modellphasen (MP) für den Fall A (Betriebsweise ohne Schacht):



Modellphasen (MP) für den Fall B (Betriebsweise mit Schacht):

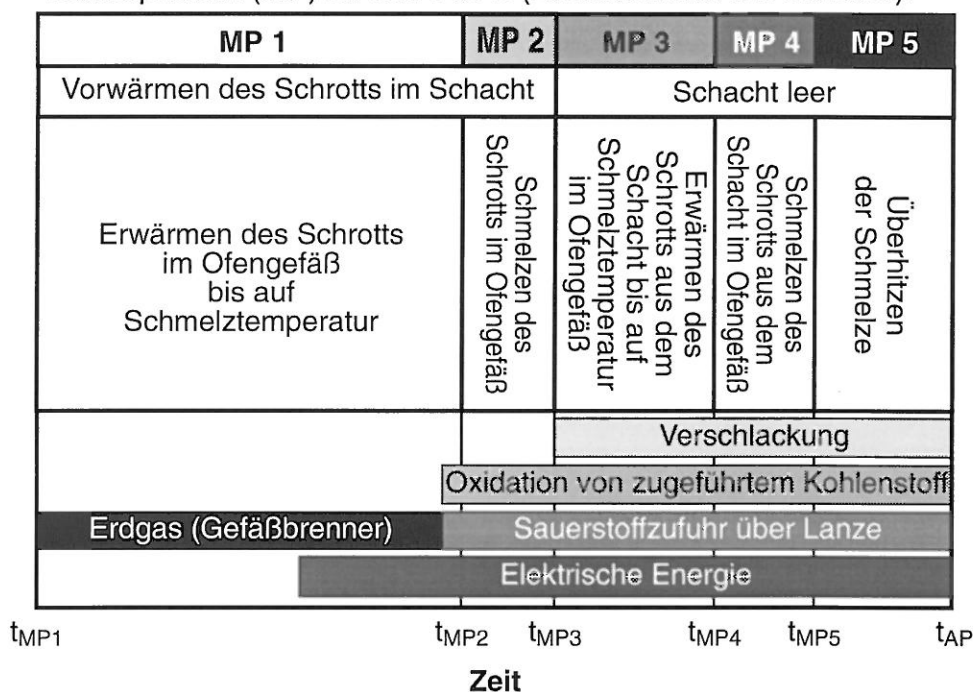


Bild 12: Gegenüberstellung der zeitlichen Abfolgen der Modellphasen für die Betriebsweisen mit und ohne Schacht (Fall A und Fall B).

Zur Zeit t_{MP3} , zu der der Schrott im Ofengefäß in beiden Fällen eingeschmolzen ist, wird im Fall A die 2. Charge mit „kaltem“ Schrott - hierfür muß der Schmelzprozeß unterbrochen werden - und im Fall B der vorgewärmte Schrott aus dem Schacht in das Ofengefäß aufgegeben. Die Masse der 2. Charge im Fall A entspricht auch hier der im Fall B über den Schacht zuge-

fürten Schrottmasse. Da die Schrottvorwärmung nur in den ersten beiden Modellphasen stattfindet, wird der Prozeß im Fall B vom Zeitpunkt t_{MP3} an mit leerem Schacht fortgesetzt.

In der **Modellphase 3** wird dann im Fall A die 2. Charge mit „kaltem“ Schrott und im Fall B der vorgewärmte Schrott aus dem Schacht durch Zufuhr von elektrischer Energie und zusätzlich durch Energie, die beim Blasen mit Sauerstoff durch Oxidation von zugeführtem Kohlenstoff und durch Verschlackung von Schmelze frei wird, im Ofengefaß bis auf Schmelztemperatur vorgewärmt. Bedingt durch die Schrottvorwärmung in den ersten beiden Modellphasen nimmt die Modellphase 3 im Fall B einen kleineren Zeitabschnitt ein als im Fall A, wodurch elektrische Energie sowie Sauerstoff und Kohlenstoff eingespart werden.

In der sich anschließenden **Modellphase 4**, die jeweils zur Zeit t_{MP4} beginnt, wird die 2. Schrottcharge (Fall A) bzw. der Schrott aus dem Schacht (Fall B) im Ofengefaß durch Zufuhr von elektrischer Energie und von Energie durch Oxidation von zugeführtem Kohlenstoff und durch Verschlackung von Schmelze eingeschmolzen.

Abschließend wird in beiden Fällen in der **Modellphase 5**, die zur Zeit t_{MP5} beginnt, die im Ofengefaß vorliegende Stahlschmelze durch elektrische Energiezufuhr und durch Zufuhr von Energie durch Oxidation von zugeführtem Kohlenstoff und durch Verschlackung von Schmelze bis auf Abstichtemperatur überhitzt.

Im Ofengefaß liegen demnach - wie auch dem **Bild 13** zu entnehmen ist, je nach Modellphase, die gerade betrachtet wird, die Stoffgruppen

- Abgas (gasförmig),
- Schrott,
- Schmelze und
- Schlacke

vor.

Von außen zugeführt werden je nach Modellphase:

- Erdgas und Sauerstoff über die Gefäßbrenner,
- elektrische Energie,
- Sauerstoff und Kohlenstoff und
- Umgebungsluft, die als Falschluff durch Öffnungen im Ofengefaß aufgrund des anliegenden Unterdruckes eindringt.

Nach außen abgeführt werden:

- der Abgasstrom,
- Verlustwärmeströme über Kühlwasserkreisläufe zur Kühlung von Gefäßwand und Deckel und
- Verlustwärmeströme über den Herd des Ofengefaßes.

Da in den einzelnen Stoffgruppen unterschiedliche Temperaturen vorliegen, wird für das Ofengefäß zur mathematischen Beschreibung des Prozeßablaufes ein heterogenes Modell zugrunde gelegt. Dabei werden die Stoffgruppen jeweils als ideale Rührkessel mit einheitlichen Temperaturen bzw. Enthalpien angenommen, deren zeitliche Abhängigkeit über Energiebilanzen ermittelt wird. Die Stoffgruppen in den verschiedenen Modellphasen werden dazu - wie in Bild 13 dargestellt - getrennt bilanziert und über die zwischen ihnen stattfindende Wärmeübertragung gekoppelt. Außer der Wärmeübertragung zwischen dem Abgas und dem Schrott (Modellphasen 1 bis 4) bzw. zwischen dem Abgas und der Schmelze/Schlacke (Modellphase 5), wird in der Modellphase 3 zusätzlich ein Wärmestrom von der Schmelze/Schlacke an den Schrott berücksichtigt, da in beiden Stoffgruppen unterschiedliche Temperaturen vorliegen.

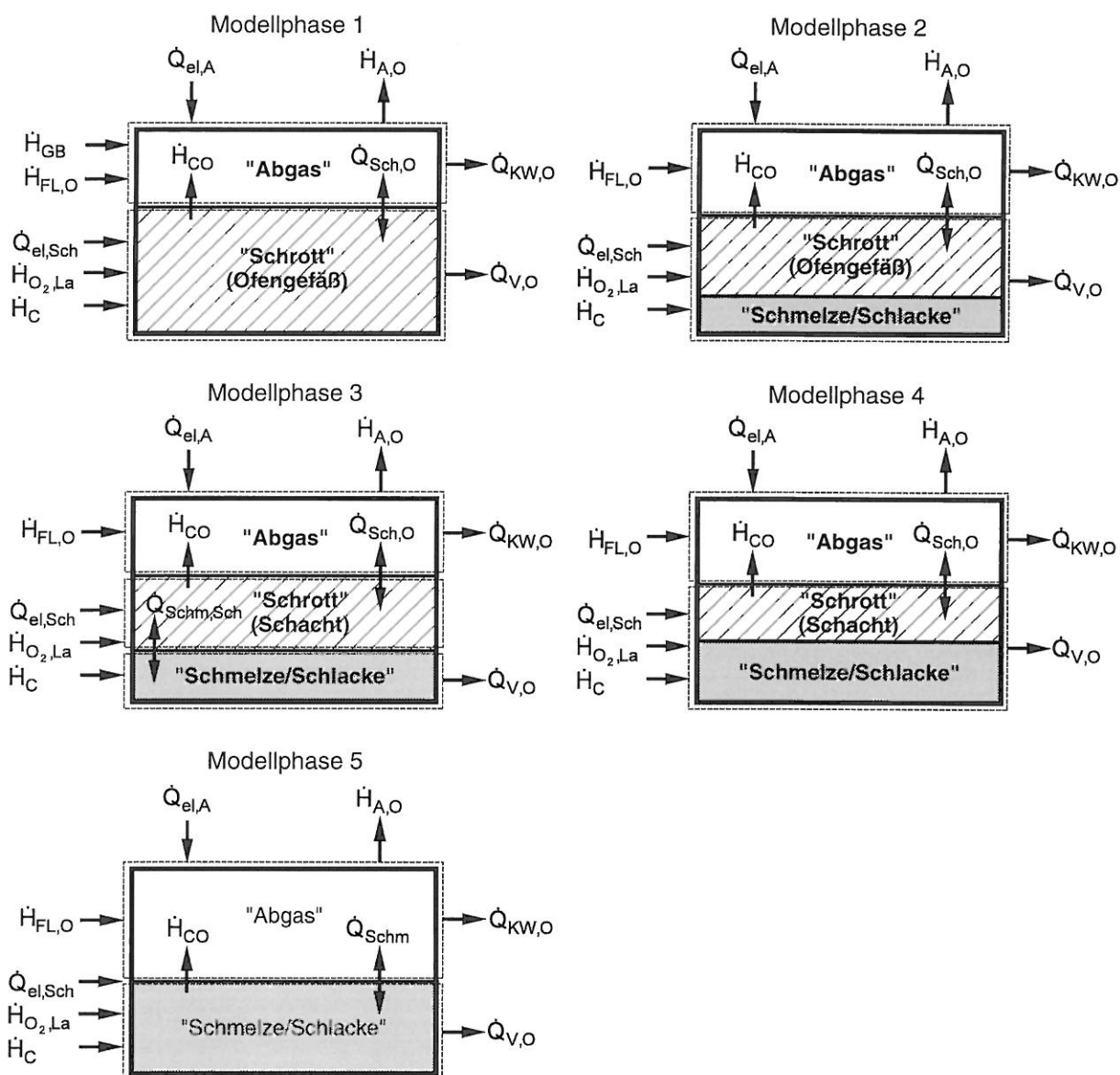


Bild 13: Energiebilanzen der einzelnen Stoffgruppen im Ofengefäß in den verschiedenen Modellphasen.

Im folgenden wird die Beschreibung der zeitlichen Abhängigkeit der Temperaturen bzw. Enthalpien der Stoffgruppen exemplarisch für die Modellphase 1 durchgeführt, in der der

Schrott im Ofengefäß wie bereits erwähnt bis auf Schmelztemperatur erwärmt wird. Unter Vernachlässigung der Energiespeicherung im Abgas, d.h. der an die Abgasmasse im Ofengefäß gebundenen Enthalpie, lautet die Energiebilanz für das **Abgas** (Bild 13)

$$\dot{H}_{GB} + \dot{H}_{FL,O} + \dot{H}_{CO} + \dot{Q}_{el,A} = \dot{H}_{A,O} + \dot{Q}_{KW,O} + \dot{Q}_{Sch,O}^{*)} . \quad (10)$$

Hierbei sind

$$\dot{H}_{GB} = \dot{m}_{EG,GB} \cdot h_{u,EG} \quad (11)$$

der Enthalpiestrom der Gefäßbrenner,

$$\dot{H}_{FL,O} = \dot{m}_{FL,O} \cdot c_L \cdot \vartheta_L \quad (12)$$

der Enthalpiestrom der in das Ofengefäß eintretenden Falschlufft,

$$\dot{H}_{A,O} = \dot{m}_{A,O} \cdot c_{A,O} \cdot \vartheta_{A,O} \quad (13)$$

der aus dem Ofengefäß austretende Abgasenthalpiestrom,

$$\dot{H}_{CO} = \dot{m}_{CO} \cdot \Delta h_{CO \rightarrow CO_2} \quad (14)$$

der Enthalpiestrom des dem Abgas zugeführten Kohlenmonoxids,

$$\dot{Q}_{el,A} = (1 - \eta_{el}) \cdot P_{el} \quad (15)$$

der vom Lichtbogen an das Abgas übertragene Wärmestrom,

$$\dot{Q}_{Sch,O} = \alpha_{Sch,O} \cdot A_{Sch,O} \cdot (\vartheta_{A,O} - \vartheta_{Sch,O}) \quad (16)$$

der vom Abgas an das Gut übertragene Wärmestrom und

$$\dot{Q}_{KW,O} = k_{W,O} \cdot A_{W,O} \cdot (\vartheta_{A,O} - \vartheta_{KW,O,a}) \quad (17)$$

der vom Abgas an das Kühlwasser übertragende Wärmestrom.

Die Energiebilanz für den **Schrott** lautet in der Modellphase 1 (Bild 13):

$$\dot{Q}_{el,Sch} + \dot{H}_{O_2,La} + \dot{H}_C + \dot{Q}_{Sch,O} = \frac{dH_{Sch,O}}{dt} + \dot{H}_{CO} + \dot{Q}_{V,O} . \quad (18)$$

Da zu Beginn des Prozesses auch Kalk als Schlackenbildner zugeführt wird, gilt hierbei für die Energiespeicherung im Schrott

$$\frac{dH_{Sch,O}}{dt} = (m_{Sch,O} \cdot c_{Sch} + m_{CaO} \cdot c_{CaO}) \cdot \frac{d\vartheta_{Sch,O}}{dt} . \quad (19)$$

^{*)} In Gleichung (10) sind die Größen abhängig von der Zeit. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird jedoch in dieser und in den folgenden Gleichungen auf eine formelmäßige Kennzeichnung der zeitlichen Abhängigkeit, wie z.B. $\dot{H}_{A,O}(t)$, $\dot{Q}_{KW,O}(t)$ und $\dot{Q}_{Sch,O}(t)$, verzichtet.

Weiter sind

$$\dot{Q}_{el,Sch} = \eta_{el} \cdot P_{el} \quad (20)$$

der vom Lichtbogen an den Schrott übertragenen Wärmestrom,

$$\dot{H}_C = \dot{m}_C \cdot \Delta h_{C \rightarrow CO_2} \quad (21)$$

der Enthalpiestrom des zugeführten Kohlenstoffes,

$$\dot{H}_{O_2,La} = \dot{m}_{O_2,La} \cdot c_{O_2} \cdot \vartheta_{O_2,La} \quad (22)$$

der Enthalpiestrom des über die Lanze zugeführten Sauerstoffes. Für den **Verlustwärmestrom** des Ofengefäßes gilt

$$\dot{Q}_{V,O} = k_H \cdot A_H \cdot (\vartheta_{Sch,O} - \vartheta_u) \quad (23)$$

Der an das **Kühlwasser** übertragene Wärmestrom (Bild 13) führt zur Enthalpieerhöhung des Kühlwassers:

$$\dot{Q}_{KW,O} = \Delta \dot{H}_{KW,O} = \dot{m}_{KW,O} \cdot c_{KW} \cdot (\vartheta_{KW,O,a} - \vartheta_{KW,O,e}) \quad (24)$$

Zur übersichtlichen Darstellung werden die folgenden Konstanten eingeführt:

$$K_1 = \alpha_{Sch,O} \cdot A_{Sch,O} + \dot{m}_{A,O} \cdot c_{A,O} + k_{W,O} \cdot A_{W,O} \quad (25)$$

$$K_2 = \frac{k_H \cdot A_H \cdot K_1 + \alpha_{Sch,O} \cdot A_{Sch,O} \cdot (\dot{m}_{A,O} \cdot c_{A,O} + k_{W,O} \cdot A_{W,O})}{K_1 \cdot (m_{Sch,O} \cdot c_{Sch} + m_{CaO} \cdot c_{CaO})} \quad (26)$$

und

$$K_3 = \frac{\alpha_{Sch,O} \cdot A_{Sch,O} \cdot (\dot{H}_{GB} + \dot{H}_{FL,O} + \dot{H}_{O_2,La} + \dot{H}_C + P_{el} + k_{W,O} \cdot A_{W,O} \cdot \vartheta_{KW,O,a})}{k_H \cdot A_H \cdot K_1 + \alpha_{Sch,O} \cdot A_{Sch,O} \cdot (\dot{m}_{A,O} \cdot c_{A,O} + k_{W,O} \cdot A_{W,O})} + \frac{(\dot{m}_{A,O} \cdot c_{A,O} + k_{W,O} \cdot A_{W,O}) \cdot (\eta_{el} \cdot P_{el} + \dot{H}_{O_2,La} + \dot{H}_C - \dot{H}_{CO}) + K_1 \cdot k_H \cdot A_H \cdot \vartheta_u}{k_H \cdot A_H \cdot K_1 + \alpha_{Sch,O} \cdot A_{Sch,O} \cdot (\dot{m}_{A,O} \cdot c_{A,O} + k_{W,O} \cdot A_{W,O})} \quad (27)$$

Für den **Schrott** ergibt sich aus den o.g. Beziehungen für die zeitliche Abhängigkeit seiner Temperatur

$$\vartheta_{Sch,O}(t) = K_3 - (K_3 - \vartheta_{Sch,O,t=0}) \cdot \exp[-K_2 \cdot t] \quad (28)$$

und durch Integration für die bis zur Zeit t an den **Schrott** übertragene Energie

$$E_{Sch,O}(t) = m_{Sch,O} \cdot c_{Sch} \cdot \int_0^t \vartheta_{Sch,O}(t) dt = m_{Sch,O} \cdot c_{Sch} \cdot (K_3 - \vartheta_{Sch,O,t=0}) \cdot (1 - \exp[-K_2 \cdot t]) \quad (29)$$

Hierbei ist $\vartheta_{Sch,O,t=0}$ die Temperatur des Schrotts zu Beginn der Modellphase 1.

Entsprechend ergibt sich die zeitliche Abhängigkeit der Temperatur des aus dem Ofengefäß austretenden **Abgases** zu

$$\vartheta_{A,O}(t) = \frac{\dot{H}_{GB} + \dot{H}_{FL,O} + \dot{Q}_{el,A} + \dot{H}_{CO} + k_{W,O} \cdot A_{W,O} \cdot \vartheta_{KW,O,a} + \alpha_{Sch,O} \cdot A_{Sch,O} \cdot \vartheta_{Sch,O}(t)}{K_1} \quad (30)$$

und die insgesamt (integral) bis zur Zeit t mit dem **Abgas** aus dem Ofengefäß abtransportierte Energie zu

$$\begin{aligned} E_{A,O}(t) &= \dot{m}_{A,O} \cdot c_{A,O} \cdot \int_0^t \vartheta_{A,O}(t) dt \\ &= \dot{m}_{A,O} \cdot c_{A,O} \cdot \frac{\dot{H}_{GB} + \dot{H}_{FL,O} + \dot{Q}_{el,A} + \dot{H}_{CO} + k_{W,O} \cdot A_{W,O} \cdot \vartheta_{KW,O,a}}{K_1} \cdot t \\ &\quad + \dot{m}_{A,O} \cdot c_{A,O} \cdot \frac{\alpha_{Sch,O} \cdot A_{Sch,O}}{K_1} \cdot \left(K_3 \cdot t + \frac{1}{K_2} \cdot (\vartheta_{Sch,O,t=0} - K_3) \cdot (1 - \exp[-K_2 \cdot t]) \right). \end{aligned} \quad (31)$$

Für die insgesamt (integral) bis zur Zeit t als **Wärmeverlust** an die Umgebung abgegebene Energie folgt:

$$\begin{aligned} E_{V,O}(t) &= k_H \cdot A_H \cdot \int_0^t (\vartheta_{Sch,O}(t) - \vartheta_u) dt \\ &= k_H \cdot A_H \cdot (K_3 - \vartheta_u) \cdot t + \frac{k_H \cdot A_H}{K_2} \cdot (\vartheta_{Sch,O,t=0} - K_3) \cdot (1 - \exp[-K_2 \cdot t]). \end{aligned} \quad (32)$$

Für die zeitliche Abhängigkeit der Temperatur des **Kühlwassers** am Eintritt in den Ofen gilt:

$$\vartheta_{KW,O,e}(t) = \left(1 + \frac{k_{W,O} \cdot A_{W,O}}{\dot{m}_{KW,O} \cdot c_{KW}} \right) \cdot \vartheta_{KW,O,a} - \frac{k_{W,O} \cdot A_{W,O}}{\dot{m}_{KW,O} \cdot c_{KW}} \cdot \vartheta_{A,O}(t). \quad (33)$$

Für die insgesamt (integral) bis zur Zeit t an das **Kühlwasser** und mit ihm abgeführte Energie ergibt sich:

$$\begin{aligned} E_{KW,O}(t) &= k_{W,O} \cdot A_{W,O} \cdot \int_0^t (\vartheta_{A,O}(t) - \vartheta_{KW,O,a}) dt \\ &= \frac{k_{W,O} \cdot A_{W,O}}{K_1} \cdot \left[(\dot{H}_{GB} + \dot{H}_{FL,O} + \dot{Q}_{el,A} + \dot{H}_{CO}) \cdot t \right. \\ &\quad \left. - (\alpha_{Sch,O} \cdot A_{Sch,O} + \dot{m}_{A,O} \cdot c_{A,O}) \cdot \vartheta_{KW,O,a} \cdot t \right. \\ &\quad \left. + \alpha_{Sch,O} \cdot A_{Sch,O} \cdot \left(K_3 \cdot t + \frac{1}{K_2} \cdot (\vartheta_{Sch,O,t=0} - K_3) \cdot (1 - \exp[-K_2 \cdot t]) \right) \right]. \end{aligned} \quad (34)$$

5.2.2 Schacht

Der Schacht wird als senkrechtstehender Rohrreaktor angenommen, in dem in den ersten beiden Modellphasen eine ruhende Schrottschüttung vorliegt, die kontinuierlich vom abgesaugten Ofenabgas durchströmt wird. Damit sind das Ofengefäß und der Schacht über die Randbedingung, daß der aus dem Ofengefäß austretende Abgasstrom gleich dem in den Schacht eintretenden Abgasstrom ist, miteinander gekoppelt.

Zur Beschreibung der orts- und zeitabhängigen Temperatur des Schrotts und des Abgases im Schacht und damit zur Berechnung der Schrottvorwärmung wird ein heterogenes Zellenmodell zugrunde gelegt. Dabei wird der Schacht, wie in **Bild 14** dargestellt, in einzelne Zellen (Bilanzräume) unterteilt, die jeweils die Stoffgruppen Schrott und Abgas enthalten. Außer der Wärmeübertragung zwischen dem Abgas und dem Schrott wird zusätzlich Energie an das Kühlwasser zur Kühlung der Schachtwand übertragen.

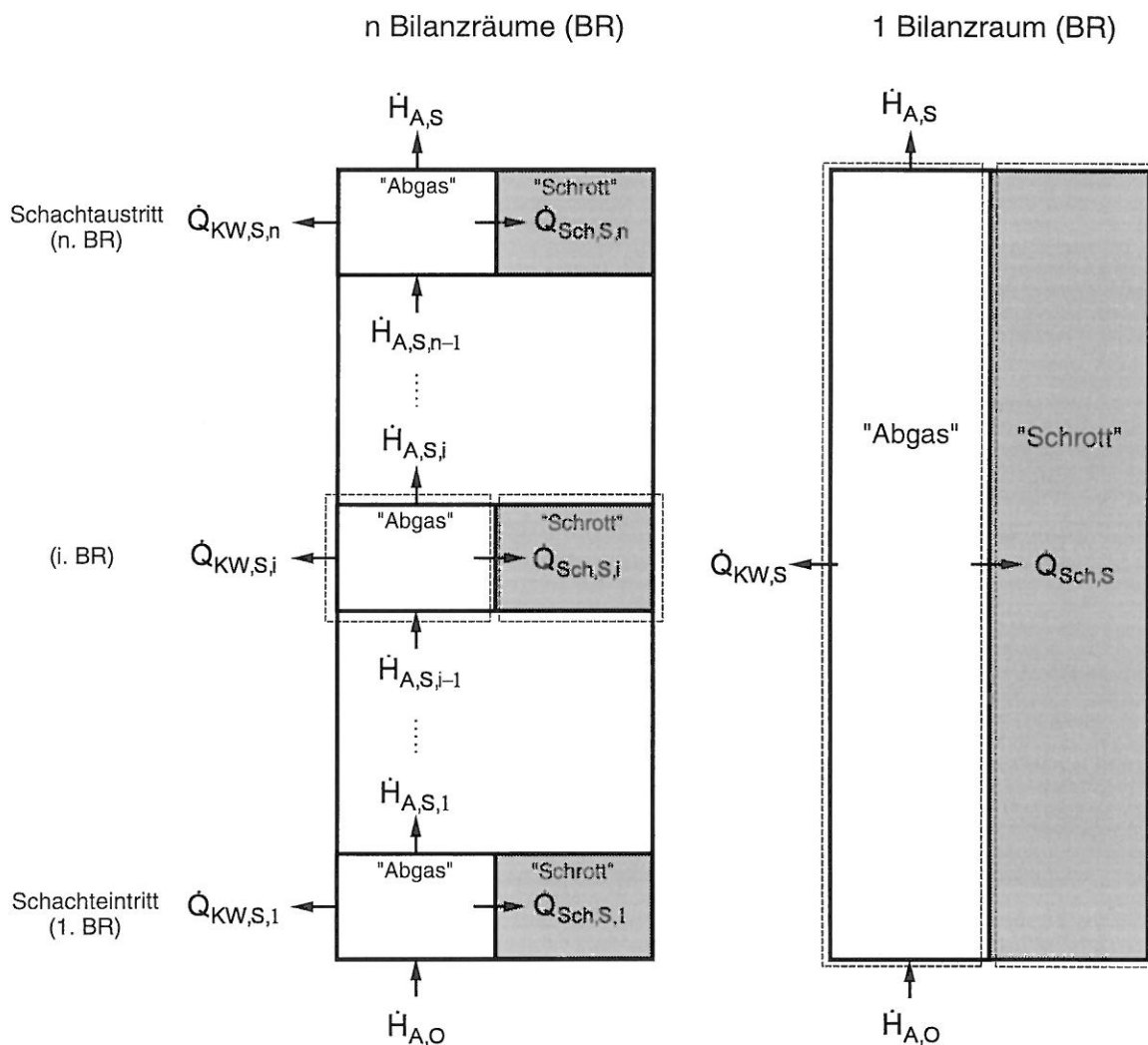


Bild 14: Energiebilanzen der Stoffgruppen im Schacht.

Die Stoffgruppen werden auch hierbei als ideale Rührkessel innerhalb jeder einzelnen Zelle mit einheitlichen Temperaturen bzw. Enthalpien angenommen und jeweils getrennt bilanziert. Die Bilanzierung aller hintereinandergeschalteten Zellen ergibt dann über die zeitliche Tempe-

raturabhängigkeit hinaus die Schrott-, Abgas- und Kühlwassertemperatur über die Höhe des Schachtes. Damit kann schließlich die insgesamt an den Schrott im Schacht übertragene und damit zurückgewonnene Energie berechnet werden.

Der Einfachheit halber werden im folgenden die Bilanzgleichungen dargestellt, die sich ergeben, wenn für den Schacht nur ein Bilanzraum zugrunde gelegt würde (rechtes Teilbild in Bild 14). Unter Vernachlässigung der Energiespeicherung im Abgas, d.h. der an die Abgasmasse im Schacht gebundenen Enthalpie, ergibt sich in diesem Fall die Energiebilanz für das **Abgas** zu

$$\dot{H}_{A,O} = \dot{H}_{A,S} + \dot{Q}_{KW,S} + \dot{Q}_{Sch,S} \quad (35)$$

Die Energiebilanz für den **Schrott** lautet:

$$\dot{Q}_{Sch,S} = \frac{dH_{Sch,S}}{dt} = m_{Sch,S} \cdot c_{Sch} \cdot \frac{d\vartheta_{Sch,S}}{dt} \quad (36)$$

und für das **Kühlwasser**:

$$\dot{Q}_{KW,S} = \Delta \dot{H}_{KW,S} = \dot{m}_{KW,S} \cdot c_{KW} \cdot (\vartheta_{KW,S,a} - \vartheta_{KW,S,e}) \quad (37)$$

Hierbei gilt für den Enthalpiestrom des aus dem Schacht austretenden Abgases

$$\dot{H}_{A,S} = \dot{m}_{A,S} \cdot c_{A,S} \cdot \vartheta_{A,S} \quad (38)$$

für den vom Abgas an den Schrott im Schacht übertragenen Wärmestrom

$$\dot{Q}_{Sch,S} = \alpha_{Sch,S} \cdot A_{Sch,S} \cdot (\vartheta_{A,S} - \vartheta_{Sch,S}) \quad (39)$$

und für den Wärmestrom zwischen Abgas und Kühlwasser

$$\dot{Q}_{KW,S} = k_{W,S} \cdot A_{W,S} \cdot (\vartheta_{A,S} - \vartheta_{KW,S,a}) \quad (40)$$

Wie bereits für das Ofengefäß werden auch für den Schacht zur übersichtlicheren Darstellung die Konstanten

$$K_4 = \frac{\alpha_{Sch,S} \cdot A_{Sch,S} \cdot (\dot{m}_{A,S} \cdot c_{A,S} + k_{W,A} \cdot A_{W,S})}{m_{Sch,S} \cdot c_{Sch} \cdot (\alpha_{Sch,S} \cdot A_{Sch,S} + \dot{m}_{A,S} \cdot c_{A,S} + k_{W,A} \cdot A_{W,S})} \quad (41)$$

und

$$K_5 = \frac{\dot{m}_{A,O} \cdot c_{A,O} \cdot \vartheta_{A,O} + k_{W,S} \cdot A_{W,S} \cdot \vartheta_{KW,S,a}}{\dot{m}_{A,S} \cdot c_{A,S} + k_{W,S} \cdot A_{W,S}} \quad (42)$$

eingeführt.

Für den **Schrott** im Schacht ergibt sich aus den o.g. Beziehungen für die zeitliche Abhängigkeit seiner Temperatur

$$\vartheta_{Sch,S}(t) = K_5 - (K_5 - \vartheta_{Sch,S,t=0}) \cdot \exp[-K_4 \cdot t] \quad (43)$$

und durch Integration für die bis zur Zeit t an den **Schrott** übertragene Energie

$$\begin{aligned} E_{Sch,S}(t) &= m_{Sch,S} \cdot c_{Sch} \cdot \int_0^t \vartheta_{Sch,S}(t) dt \\ &= m_{Sch,S} \cdot c_{Sch} \cdot (K_5 - \vartheta_{Sch,S,t=0}) \cdot (1 - \exp[-K_4 \cdot t]) , \end{aligned} \quad (44)$$

wobei $\vartheta_{Sch,S,t=0}$ die Temperatur des **Schrotts** im Schacht zu Beginn der Modellphase 1 ist.

Entsprechend ergibt sich die zeitliche Abhängigkeit der Temperatur des aus dem Schacht austretenden **Abgases** zu

$$\vartheta_{A,S}(t) = \frac{\alpha_{Sch,S} \cdot A_{Sch,S} \cdot \vartheta_{Sch,S}(t) + k_{W,S} \cdot A_{W,S} \cdot \vartheta_{KW,S,a} + \dot{m}_{A,O} \cdot c_{A,O} \cdot \vartheta_{A,O}(t)}{\alpha_{Sch,S} \cdot A_{Sch,S} + \dot{m}_{A,S} \cdot c_{A,S} + k_{W,S} \cdot A_{W,S}} \quad (45)$$

und die insgesamt (integral) bis zur Zeit t mit dem **Abgas** aus dem Schacht abtransportierte Energie zu

$$\begin{aligned} E_{A,S}(t) &= \dot{m}_{A,S} \cdot c_{A,S} \cdot \int_0^t \vartheta_{A,S}(t) dt = \dot{m}_{A,S} \cdot c_{A,S} \cdot K_5 \cdot t \\ &\quad + \frac{\dot{m}_{A,S} \cdot c_{A,S} \cdot m_{Sch,S} \cdot c_{Sch}}{\dot{m}_{A,S} \cdot c_{A,S} + k_{W,S} \cdot A_{W,S}} \cdot (\vartheta_{Sch,S,t=0} - K_5) \cdot (1 - \exp[-K_4 \cdot t]) . \end{aligned} \quad (46)$$

Für die zeitliche Abhängigkeit der Temperatur des **Kühlwassers** am Eintritt in den Schacht gilt:

$$\vartheta_{KW,S,e}(t) = \left(1 + \frac{k_{W,S} \cdot A_{W,S}}{\dot{m}_{KW,S} \cdot c_{KW}} \right) \cdot \vartheta_{KW,S,a} - \frac{k_{W,S} \cdot A_{W,S}}{\dot{m}_{KW,S} \cdot c_{KW}} \cdot \vartheta_{A,S}(t) . \quad (47)$$

Die insgesamt (integral) bis zur Zeit t an das **Kühlwasser** im Schacht und mit ihm abgeführte Energie ergibt sich zu:

$$\begin{aligned} E_{KW,S}(t) &= k_{W,S} \cdot A_{W,S} \cdot \int_0^t (\vartheta_{A,S}(t) - \vartheta_{KW,S,a}) dt \\ &= (K_5 - \vartheta_{KW,S,a}) \cdot k_{W,S} \cdot A_{W,S} \cdot t \\ &\quad + \frac{k_{W,S} \cdot A_{W,S} \cdot m_{Sch,S} \cdot c_{Sch}}{\dot{m}_{A,S} \cdot c_{A,S} + k_{W,S} \cdot A_{W,S}} \cdot (\vartheta_{Sch,S,t=0} - K_5) \cdot (1 - \exp[-K_4 \cdot t]) . \end{aligned} \quad (48)$$

Werden nun für den Schacht beliebig viele Bilanzräume (n Bilanzräume bzw. Zellen) berücksichtigt, (linkes Teilbild in Bild 14), so sind die obigen für den Schacht genannten Gleichungen für jeden Bilanzraum anzusetzen.

5.2.3 Nachbrennkammer

Durch die Nachverbrennung soll sichergestellt werden, daß das aus dem Schacht austretende Abgas zu jeder Zeit während des gesamten Prozesses ausreichend nachverbrannt wird. Die hierfür erforderlichen Brennstoff- und Luftströme sind abhängig von dem aus dem Ofengefäß (im Fall A) bzw. aus dem Schacht (im Fall B) austretenden Abgasstrom (vgl. hierzu auch Bild 10) und werden über Bilanzgleichungen - **Bild 15** zeigt exemplarisch die Energiebilanzen für die Nachbrennkammer für die Fälle A und B - ermittelt. Hierbei werden

- die Temperatur in der Nachbrennkammer $\vartheta_{A,N}$,
- die Temperatur der Verbrennungsluft $\vartheta_{L,N}$ und
- die Luftzahl λ_N

jeweils als Haupteinflußgrößen variiert oder in Anlehnung an gesetzliche Rahmenbedingungen festgelegt, um z.B. die in [38] geforderten Emissionsgrenzwerte für Schadstoffkomponenten einhalten zu können.

Die Energiebilanz für die Nachbrennkammer ergibt sich im Fall A zu

$$\dot{H}_{A,O} + \dot{H}_{EG,N} + \dot{H}_{L,N} = \dot{H}_{A,N} + \dot{Q}_{V,N} \quad (49)$$

bzw. im Fall B zu

$$\dot{H}_{A,S} + \dot{H}_{EG,N} + \dot{H}_{L,N} = \dot{H}_{A,N} + \dot{Q}_{V,N} \quad (50)$$

Mit

$$\dot{Q}_{V,N} = k_{W,N} \cdot A_{W,N} \cdot (\vartheta_{A,N} - \vartheta_u) \quad (51)$$

als den Verlustwärmestrom der Nachbrennkammer.

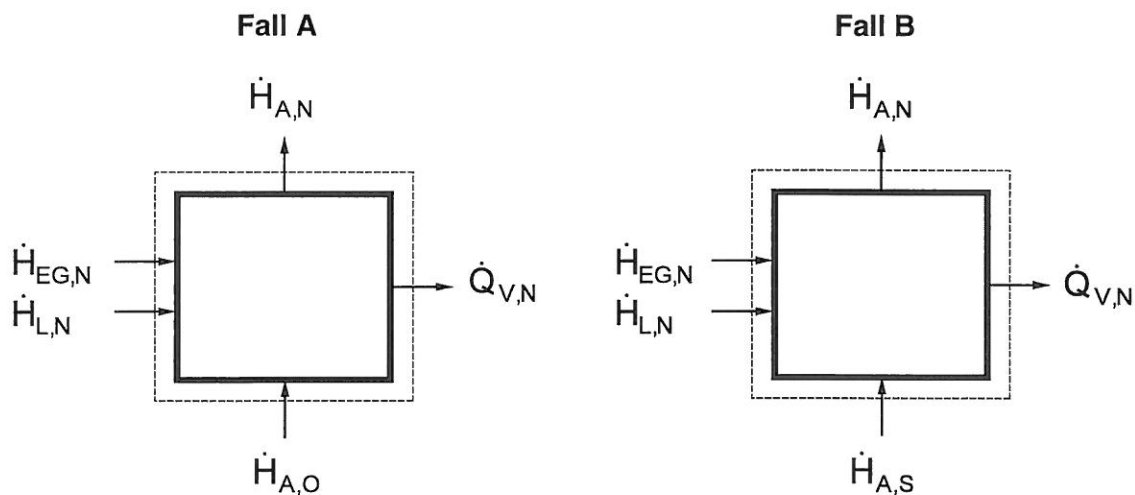


Bild 15: Energiebilanz für die Nachbrennkammer (Fall A und Fall B).

Daraus folgt für die zeitliche Abhängigkeit der thermischen Leistung für die Nachverbrennung der Abgase im Fall A

$$P_{th,N,oS}(t) = h_{u,EG} \cdot \frac{\dot{m}_{A,O} \cdot (c_{A,N} \cdot \vartheta_{A,N} - c_{A,O} \cdot \vartheta_{A,O}(t)) + \dot{Q}_{V,N}}{h_{u,EG} + \lambda_N \cdot l_{min,EG} \cdot c_L \cdot \vartheta_{L,N} - (1 + \lambda_N \cdot l_{min,EG}) \cdot c_{A,N} \cdot \vartheta_{A,N}} \quad (52)$$

und im Fall B

$$P_{th,N,mS}(t) = h_{u,EG} \cdot \frac{\dot{m}_{A,S} \cdot (c_{A,N} \cdot \vartheta_{A,N} - c_{A,S} \cdot \vartheta_{A,S}(t)) + \dot{Q}_{V,N}}{h_{u,EG} + \lambda_N \cdot l_{min,EG} \cdot c_L \cdot \vartheta_{L,N} - (1 + \lambda_N \cdot l_{min,EG}) \cdot c_{A,N} \cdot \vartheta_{A,N}} \quad (53)$$

Für die insgesamt (integral) bis zur Zeit t zur Nachverbrennung der Ofen- bzw. Schachtabgase benötigte Energie ergibt sich damit im Fall A

$$\begin{aligned} E_{EG,N,oS}(t) &= \int_0^t P_{th,N,oS}(t) dt \\ &= \frac{h_{u,EG} \cdot \left[(\dot{m}_{A,O} \cdot c_{A,N} + k_{W,N} \cdot A_{W,N}) \cdot \vartheta_{A,N} - k_{W,N} \cdot A_{W,N} \cdot \vartheta_u \right]}{h_{u,EG} + \lambda_N \cdot l_{min,EG} \cdot c_L \cdot \vartheta_{L,N} - (1 + \lambda_N \cdot l_{min,EG}) \cdot c_{A,N} \cdot \vartheta_{A,N}} \cdot t - E_{A,O}(t) \end{aligned} \quad (54)$$

und im Fall B

$$\begin{aligned} E_{EG,N,mS}(t) &= \int_0^t P_{th,N,mS} dt \\ &= \frac{h_{u,EG} \cdot \left[(\dot{m}_{A,S} \cdot c_{A,N} + k_{W,N} \cdot A_{W,N}) \cdot \vartheta_{A,N} - k_{W,N} \cdot A_{W,N} \cdot \vartheta_u \right]}{h_{u,EG} + \lambda_N \cdot l_{min,EG} \cdot c_L \cdot \vartheta_{L,N} - (1 + \lambda_N \cdot l_{min,EG}) \cdot c_{A,N} \cdot \vartheta_{A,N}} \cdot t - E_{A,S}(t) \end{aligned} \quad (55)$$

Die Gleichungen (54) und (55) verdeutlichen, daß sich die zur Nachverbrennung erforderliche Energie als Differenz der mit dem Abgas aus der Nachbrennkammer abtransportierten Energie und der mit dem Abgas aus dem Ofengefäß (Fall A) bzw. aus dem Schacht (Fall B) zugeführten Energie ergibt.

5.3 Ergebnisse der Modellrechnungen

In **Bild 16** sind für den Fall A (Betriebsweise ohne Schacht) die Temperatur des aus dem Ofengefäß austretenden Abgases $\vartheta_{A,O}$ (berechnet nach Gleichung (30)) sowie die mittleren Temperaturen der beiden Schrottchargen im Ofengefäß $\vartheta_{Sch,O,1}$ und $\vartheta_{Sch,O,2}$ (berechnet nach Gleichung (28)) über der Zeit dargestellt. **Bild 17** zeigt entsprechend für den Fall B (Betriebsweise mit Schacht) die Temperaturen des aus dem Ofengefäß und aus dem Schacht austretenden Abgases $\vartheta_{A,O}$ (Gleichung (30)) und $\vartheta_{A,S}$ (Gleichung (45)) sowie die mittleren Temperaturen des Schrotts im Ofengefäß $\vartheta_{Sch,O}$ (Gleichung (28)) und im Schacht $\vartheta_{Sch,S}$ (Gleichung (43)) in Abhängigkeit von der Zeit.

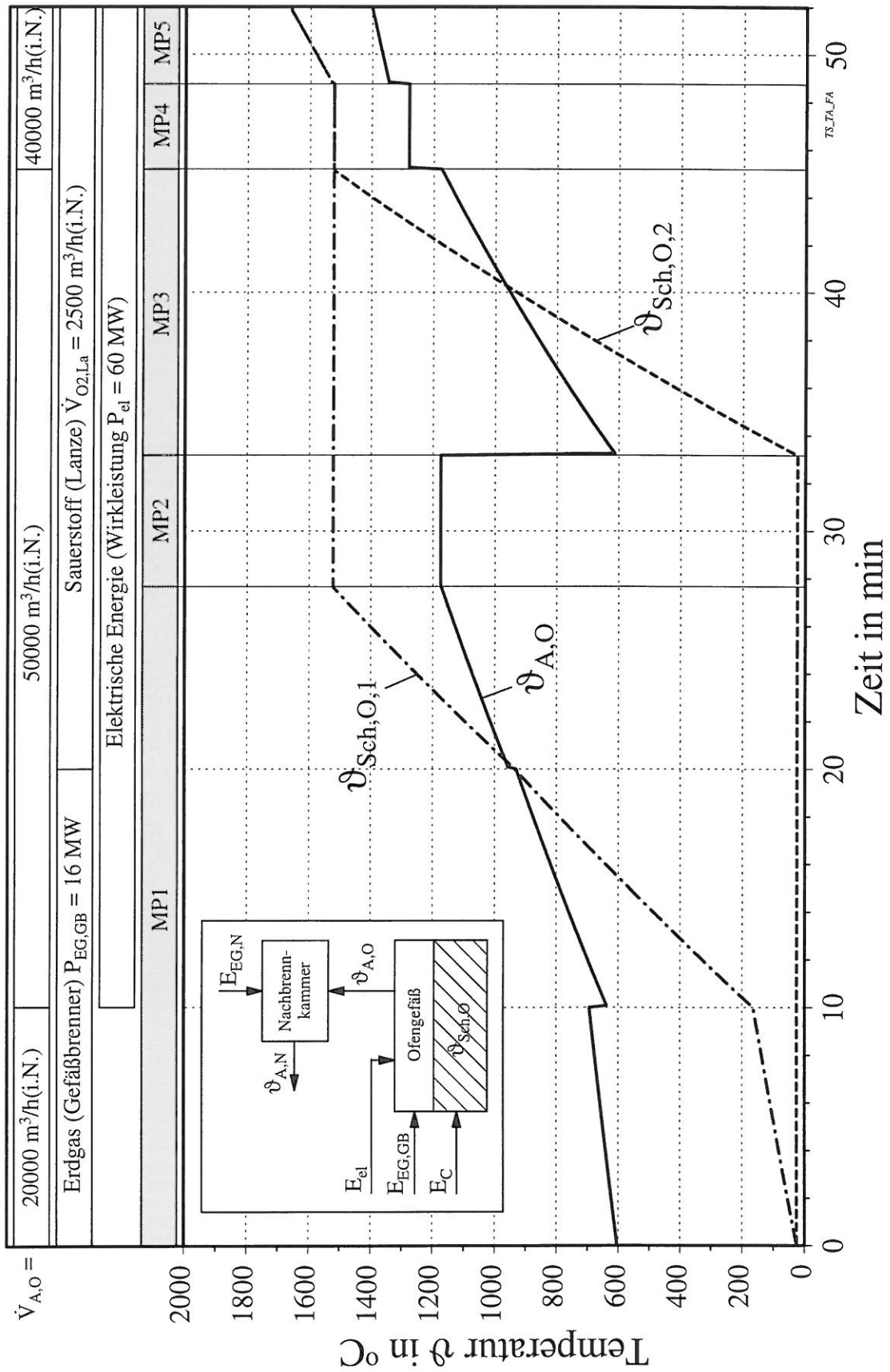


Bild 16: Schrott- und Abgastemperaturen für Fall A (Betriebsweise ohne Schacht).

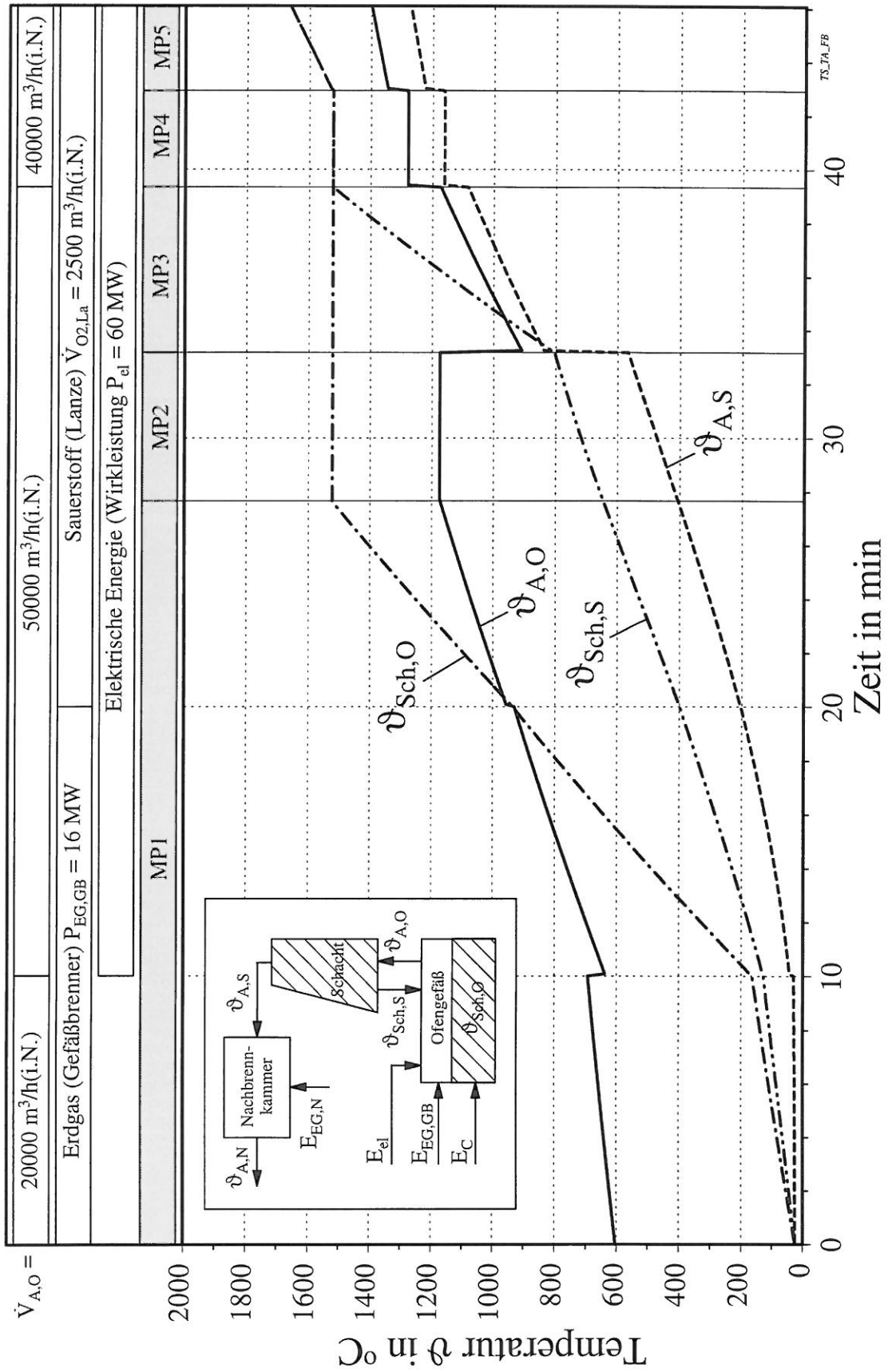


Bild 17: Schrott- und Abgastemperaturen für Fall B (Betriebsweise mit Schacht).

In den Bildern sind jeweils die Zahlenwerte für die wesentlichen den Modellrechnungen zugrunde liegenden Prozeßgrößen mit dargestellt (vgl. hierzu Kapitel 2.1). Im einzelnen sind dies

- der Volumenstrom des aus dem Ofengefäß abgesaugten Abgases,
- die elektrische Wirkleistung, die an den Schrott bzw. an die Schmelze im Ofengefäß übertragen wird,
- die thermische Leistung der Gefäßbrenner und
- der über die Lanze zugeführte Sauerstoffvolumenstrom.

Desweiteren liegen den Berechnungen folgende Randbedingungen und Modellparameter zugrunde:

Randbedingungen:

- *Ofengefäß:*
 - ◆ Volumen: $V_O = 90 \text{ m}^3$,
 - ◆ Höhe: $z_O = 3 \text{ m}$,
 - ◆ Schrottmasse (im Fall B): $m_{Sch,O} = 63000 \text{ kg}$,
 - ◆ Schrottmasse der 1. Charge (im Fall A): $m_{Sch,O,1} = 63000 \text{ kg}$,
 - ◆ Schrottmasse der 2. Charge (im Fall A): $m_{Sch,O,2} = 42000 \text{ kg}$,
 - ◆ Schrottemperatur zur Zeit $t = 0$: $\vartheta_{Sch,O,t=0} = 25^\circ\text{C}$,
 - ◆ Temperatur der eintretenden Umgebungs- bzw. Falschluf: $\vartheta_{FL,O} = 25^\circ\text{C}$,
 - ◆ Kühlwasservolumenstrom (gesamt): $\dot{V}_{KW,O} = 750 \text{ m}^3/\text{h}$.
- *Schacht:*
 - ◆ Volumen: $V_S = 60 \text{ m}^3$,
 - ◆ Höhe: $z_S = 5 \text{ m}$,
 - ◆ Schrottmasse im Schacht (Fall B): $m_{Sch,S} = 42000 \text{ kg}$,
 - ◆ Schrottemperatur zur Zeit $t = 0$: $\vartheta_{Sch,S,t=0} = 25^\circ\text{C}$,
 - ◆ Kühlwasservolumenstrom (gesamt): $\dot{V}_{KW,S} = 1200 \text{ m}^3/\text{h}$.
- *Nachbrennkammer:*
 - ◆ Abgastemperatur: $\vartheta_{A,N} = 850^\circ\text{C}$,
 - ◆ Luftzahl: $\lambda_N = 1,1$,
 - ◆ Verbrennungslufttemperatur: $\vartheta_{L,N} = 25^\circ\text{C}$.

Modellparameter:

- *Schrott:*
 - ◆ Schüttdichte: $\rho_{Sch} = 750 \text{ kg/m}^3$
 - ◆ Spezifische Oberfläche: $f_{Sch} = 40 \text{ m}^2/\text{m}^3$

- Wärmeübergangs- und durchgangskoeffizienten:
 - ◆ zwischen Abgas und Schrott (Ofengefäß),
 - ◆ zwischen Abgas und Schrott (Schacht),
 - ◆ zwischen Abgas und Kühlwasser (Ofen),
 - ◆ zwischen Abgas und Kühlwasser (Schacht),
 - ◆ zwischen Abgas und Schmelze,
 - ◆ zwischen Schrott bzw. Schmelze und Umgebung,
 - ◆ zwischen Abgas (Nachbrennkammer) und Umgebung.

Angaben über die Schüttdichte und über die spezifische Oberfläche des Schrotts sind z.B. in [39] zu finden. Zur Festlegung der Wärmeübergangs- und durchgangskoeffizienten wurden zum einen Nusselt-Funktionen (z.B. [40]) benutzt und zum anderen, z.B. zur Beschreibung des Wärmedurchganges zwischen Abgas und Kühlwasser, Ergebnisse aus Meßserien, die an bestehenden Anlagen durchgeführt wurden, zugrunde gelegt.

In **Bild 18** sind für den Fall A (Betriebsweise ohne Schacht) und in **Bild 19** entsprechend für den Fall B (Betriebsweise mit Schacht) die jeweils insgesamt (integral) während des gesamten Prozesses zu- und abgeführten Massen- und Energien dargestellt. Die einzelnen insgesamt zu- und abgeführten Massen ergeben sich hierbei jeweils durch Integration der entsprechenden Massenströme über der Zeit vom Anfang bis zum Ende des Prozesses nach der Gleichung

$$m_i = \int_0^{t_{ges}} \dot{m}_i(t) dt. \quad (56)$$

Neben den in Kapitel 5.2 aufgeführten Gleichungen gilt entsprechend für die einzelnen insgesamt (integral) zugeführten Energien

$$E_i = \int_0^{t_{ges}} \dot{E}_i(t) dt. \quad (57)$$

Außer der Zuführung von Erdas, Kohlenstoff und elektrischer Energie als Hauptenergieeinträge wird beim Blasen mit Sauerstoff (Kombilanze) zusätzlich Energie durch Verschlackung von Schmelze eingetragen. Dieser Energieeintrag ist sowohl im Fall A als auch im Fall B nur in den Modellphasen 3,4 und 5 zu berücksichtigen und spielt während der Schrottvorwärmung in den Modellphasen 1 und 2 eine untergeordnete Rolle. Für eine Beurteilung des relativen Einflusses der Schrottvorwärmung auf wesentliche Energieeinträge (elektrische Energie, Erdgas und Kohlenstoff) durch Vergleich von verschiedenen Anlagenvarianten, worauf in Kapitel 6 eingegangen wird, wurde daher die durch Verschlackung eingetragene Energie sowie auch die mit der Schlacke abgeführte Energie in den Modellrechnungen zunächst vernachlässigt. Desweiteren wurden außer der Wärmeübertragung an das Kühlwasser im Ofen und im Schacht keine weiteren Wärmeverluste berücksichtigt. Dies sind z.B. Wärmeverluste über den Herdboden, zusätzliche Wärmeverluste durch Abstrahlung bei geöffnetem Ofen während des Aufgebens der 2. Schrottcharge im Fall A, die im Fall B ohnehin zu vernachlässigen sind.

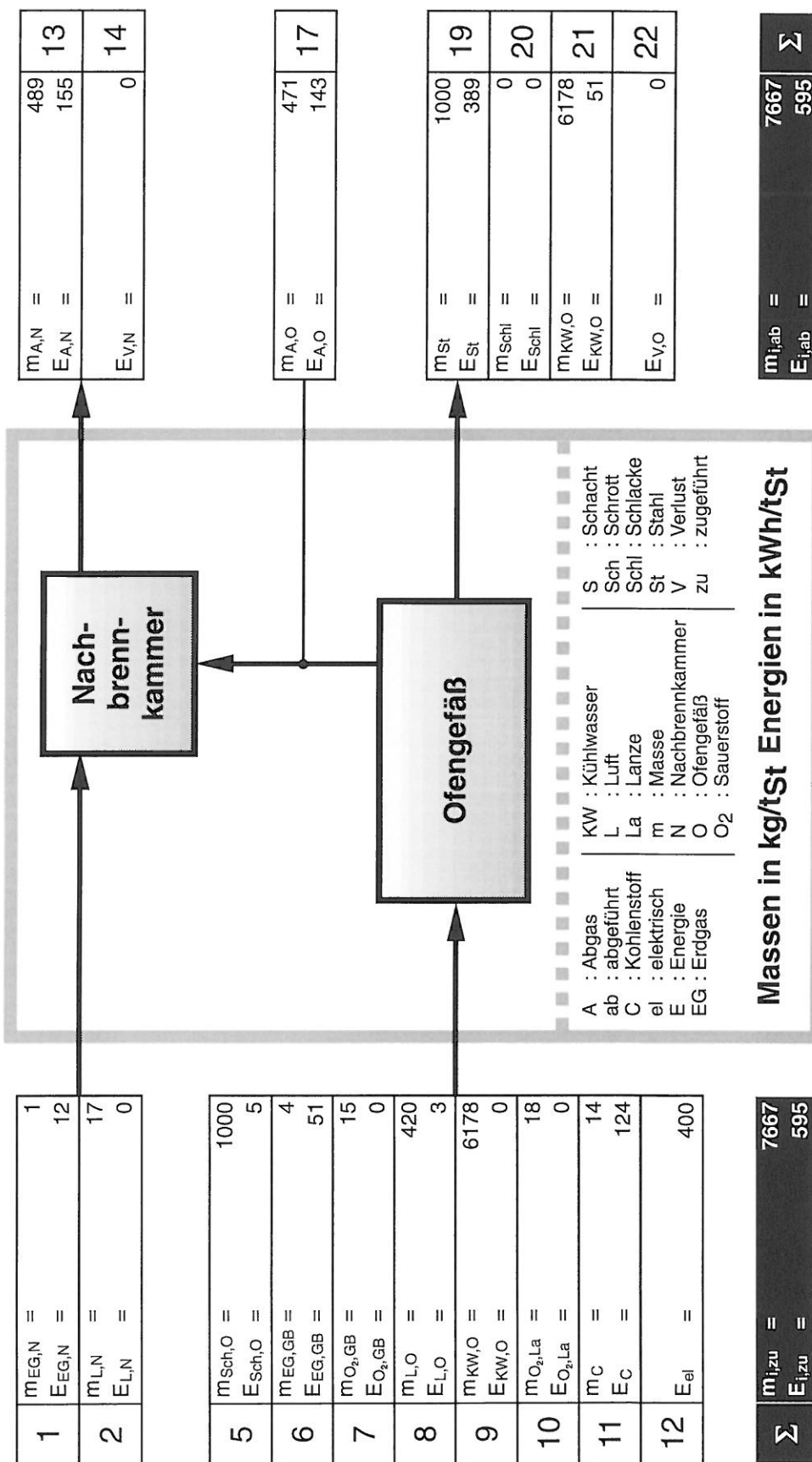


Bild 18: Gesamtmassen- und -energiebilanzen (integral) für Fall A (Betriebsweise ohne Schacht).

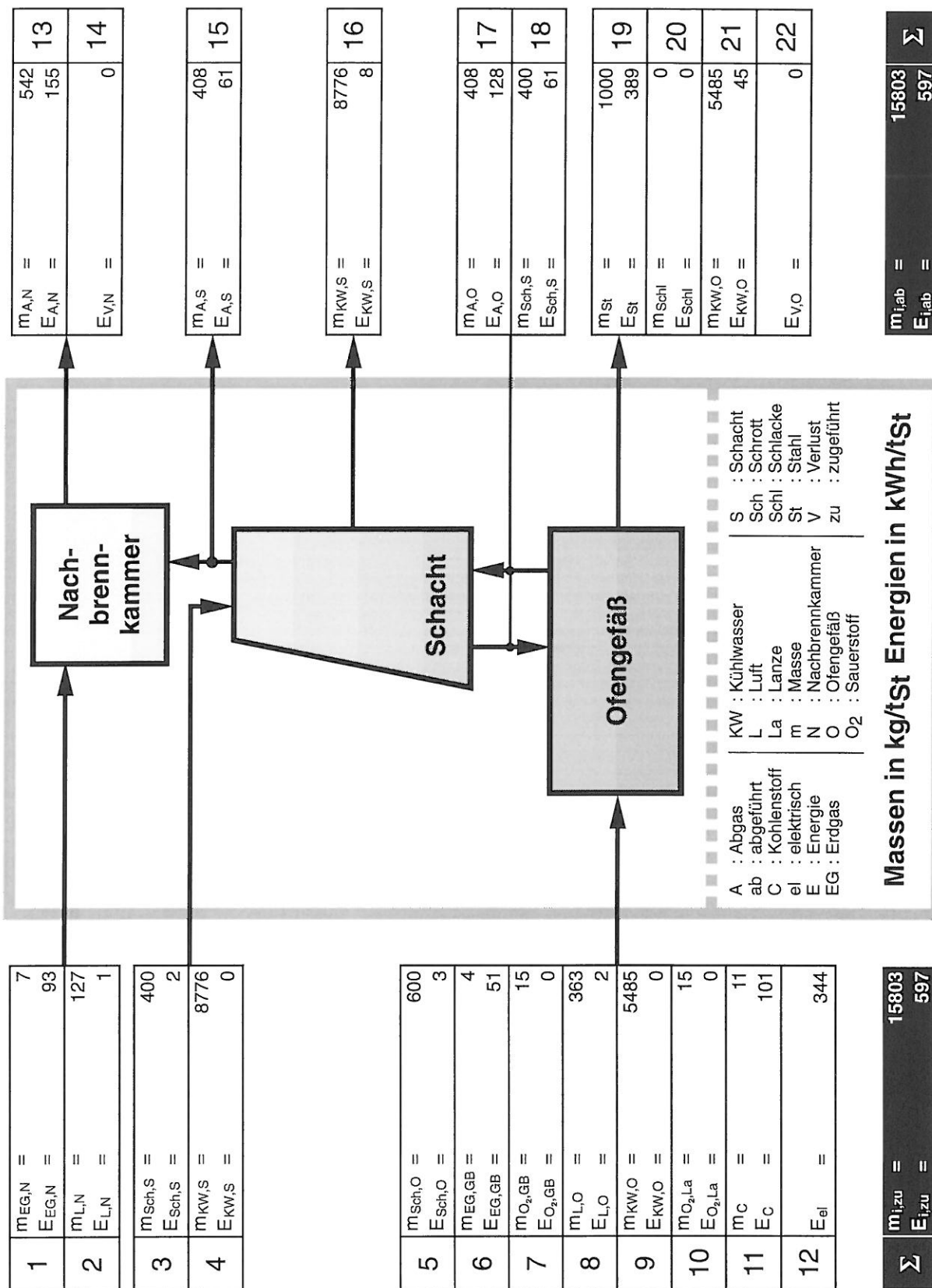


Bild 19: Gesamtmassen- und -energiebilanzen (integral) für Fall B (Betriebsweise mit Schacht).

6 Bewertung des Energieeinsatzes für verschiedene Anlagenvarianten

In **Tabelle 1** sind für die untersuchten Fälle AoN, AmN, BoN und BmN die insgesamt (integral) während des gesamten Prozesses eingetragenen Energien (vgl. hierzu Bild 18 und Bild 19) als Verbräuche an Primärenergie in kWh/t_{St} dargestellt. Spalte 1 enthält die zur Erzeugung der elektrischen Energie bereitzustellende Primärenergie, wobei die Primärenergiebewertungszahl (vgl. Kapitel 4) mit $a = 1$, $a = 2$ und $a = 3$ angenommen wird. In Anlehnung an Gleichung (57) gilt hierbei für die elektrische Energie:

$$E_{el} = \int_0^{t_{ges}} P_{el}(t) dt \quad . \quad (58)$$

In den Spalten 2 bis 4 folgen die Einträge an Primärenergie durch Zufuhr von Kohlenstoff (Spalte 2) und durch Zufuhr von Erdgas über die Gefäßbrenner (Spalte 3) und für die Abgasnachverbrennung (Nachbrennkammer) (Spalte 4). Für die Kohlenstoffzufuhr gilt

$$E_C = \int_0^{t_{ges}} \dot{H}_C(t) dt \quad (59)$$

und für die Energiezufuhr über die Gefäßbrenner

$$E_{EG,GB} = \int_0^{t_{ges}} \dot{H}_{GB}(t) dt \quad . \quad (60)$$

Für den Primärenergieverbrauch $E_{EG,N}$ für die thermische Abgasnachbehandlung gilt Gleichung (54) im Fall A bzw. Gleichung (55) im Fall B.

Nr.	Fall	1	2	3	4	5
		$a \cdot E_{el}$ kWh/t _{St}	E_C kWh/t _{St}	$E_{EG,GB}$ kWh/t _{St}	$E_{EG,N}$ kWh/t _{St}	E_{pr} kWh/t _{St}
1	AoN (a = 1)	400	124	51	0	575
2	AoN (a = 2)	800	124	51	0	975
3	AoN (a = 3)	1200	124	51	0	1375
4	AmN (a = 1)	400	124	51	12	587
5	AmN (a = 2)	800	124	51	12	987
6	AmN (a = 3)	1200	124	51	12	1387
7	BoN (a = 1)	344	101	51	0	496
8	BoN (a = 2)	688	101	51	0	840
9	BoN (a = 3)	1032	101	51	0	1184
10	BmN (a = 1)	344	101	51	93	589
11	BmN (a = 2)	688	101	51	93	933
12	BmN (a = 3)	1032	101	51	93	1277

Tabelle 1: Primärenergieverbräuche in kWh/t_{St} für die untersuchten Fälle.

Die Spalte 5 enthält den insgesamt pro Tonne Stahl erforderlichen Primärenergiebedarf, der sich aus der Summe der einzelnen Beträge gemäß

$$E_{pr} = E_{el} + E_C + E_{EG,GB} + E_{EG,N} \quad (62)$$

ergibt.

Anhand der in Tabelle 1 dargestellten Werte kann nun der Einsatz an Primärenergie für verschiedene Anlagenvarianten durch Vergleich der einzelnen Fälle, wie in Kapitel 5.1 (Bild 10) beschrieben, beurteilt werden. Dazu werden die folgenden Bewertungszahlen Z_1 bis Z_4 gebildet:

Bewertungszahl Z_1 :

Will man den Einfluß der *Nachbrennkammer* auf den Energieeinsatz für den gesamten Stahlerzeugungsprozeß *ohne Schacht* beurteilen, so sind die Primärenergieaufwendungen $E_{pr,AoN}$ und $E_{pr,AmN}$ miteinander zu vergleichen, indem die folgende Bewertungszahl Z_1 (Bild 10) gebildet wird:

$$Z_1 = \frac{E_{pr,AoN} - E_{pr,AmN}}{E_{pr,AoN}} = \frac{\Delta E_{pr,N,oS}}{E_{pr,AoN}} \quad (62)$$

Bewertungszahl Z_2 :

Will man den Einfluß der *Nachbrennkammer* auf den Energieeinsatz für den gesamten Stahlerzeugungsprozeß *mit Schacht* beurteilen, so sind die Primärenergieaufwendungen $E_{pr,BoN}$ und $E_{pr,BmN}$ miteinander zu vergleichen, indem die folgende Bewertungszahl Z_2 (Bild 10) gebildet wird:

$$Z_2 = \frac{E_{pr,BoN} - E_{pr,BmN}}{E_{pr,BoN}} = \frac{\Delta E_{pr,N,mS}}{E_{pr,BoN}} \quad (63)$$

Bewertungszahl Z_3 :

Will man den Einfluß des *Schachtes* auf den Energieeinsatz für den gesamten Stahlerzeugungsprozeß *ohne Nachbrennkammer* beurteilen, so sind die Primärenergieaufwendungen $E_{pr,AoN}$ und $E_{pr,BoN}$ miteinander zu vergleichen, indem die folgende Bewertungszahl Z_3 (Bild 10) gebildet wird:

$$Z_3 = \frac{E_{pr,AoN} - E_{pr,BoN}}{E_{pr,AoN}} = \frac{\Delta E_{pr,S,oN}}{E_{pr,AoN}} \quad (64)$$

Bewertungszahl Z_4 :

Will man den Einfluß des *Schachtes* auf den Energieeinsatz für den gesamten Stahlerzeugungsprozeß *mit Nachbrennkammer* beurteilen, so sind die Primärenergieaufwendungen $E_{pr,AmN}$ und $E_{pr,BmN}$ miteinander zu vergleichen, indem die folgende Bewertungszahl Z_4 (Bild 10) gebildet wird:

$$Z_4 = \frac{E_{pr,AmN} - E_{pr,BmN}}{E_{pr,AmN}} = \frac{\Delta E_{pr,S,mN}}{E_{pr,AmN}} \quad (65)$$

Zur Ermittlung der Bewertungszahlen anhand der Ergebnisse in Tabelle 1 wird im folgenden ein Beispiel für die Beurteilung des Einflusses des Schachtes mit Nachbrennkammer (Z_4) auf den gesamten Energieeinsatz gezeigt, wobei eine Primärenergiebewertungszahl von $a = 2$ angenommen wird. Die Bewertungszahl wird in diesem Fall mit $Z_{4,2}$ abgekürzt (der 1. Index kennzeichnet die Gegenüberstellung der Fälle AmN und BmN, der 2. Index steht für den Betrag der Primärenergiebewertungszahl). In Anlehnung an Gleichung (65) folgt somit

$$Z_{4,2} = \frac{(2 \cdot E_{el,AmN} - 2 \cdot E_{el,BmN}) + (E_{C,AmN} - E_{C,BmN})}{E_{pr,AmN}} + \frac{(E_{EG,GB,AmN} - E_{EG,GB,BmN}) + (E_{EG,N,AmN} - E_{EG,N,BmN})}{E_{pr,AmN}} \quad (66)$$

bzw.

$$Z_{4,2} = \frac{2 \cdot \Delta E_{el} + \Delta E_C + \Delta E_{EG,GB} + \Delta E_{EG,N}}{E_{pr,AmN}} = \frac{\Delta E_{pr}}{E_{pr,AmN}} \quad (67)$$

Mit den Ergebnissen aus Tabelle 1 folgt aus den Gleichungen (64) und (65) für die Bewertungszahl $Z_{4,2}$ die folgende Zahlenwertgleichung:

$$\begin{aligned} Z_{4,2} &= \frac{(2 \cdot 400 - 2 \cdot 344) + (124 - 101) + (51 - 51) + (12 - 93)}{987} \\ &= \frac{112 + 23 + 0 - 81}{987} = \frac{54}{987} \end{aligned}$$

und damit für die Bewertungszahl

$$Z_{4,2} = 5,5\% .$$

D.h. daß bei der Elektrostahlerzeugung in einem Einzelschachtofen mit Nachverbrennung der Schachtabgase 5,5% der insgesamt erforderlichen Primärenergie durch Schrottvorwärmung im Schacht eingespart werden können.

Die Ergebnisse aller Vergleiche können der **Tabelle 2** entnommen werden.

Index	Gegenüberstellung	1 $a \cdot \Delta E_{el}$ kWh/t _{St}	2 ΔE_C kWh/t _{St}	3 $\Delta E_{EG,GB}$ kWh/t _{St}	4 $\Delta E_{EG,N}$ kWh/t _{St}	5 ΔE_{pr} kWh/t _{St}	6 Z %
1,1	AoN - AmN (a = 1)	0	0	0	-12	-12	-2,1
1,2	AoN - AmN (a = 2)	0	0	0	-12	-12	-1,2
1,3	AoN - AmN (a = 3)	0	0	0	-12	-12	-0,9
2,1	BoN - BmN (a = 1)	0	0	0	-93	-93	-18,8
2,2	BoN - BmN (a = 2)	0	0	0	-93	-93	-11,1
2,3	BoN - BmN (a = 3)	0	0	0	-93	-93	-7,9
3,1	AoN - BoN (a = 1)	56	23	0	0	79	13,7
3,2	AoN - BoN (a = 2)	112	23	0	0	135	13,8
3,3	AoN - BoN (a = 3)	168	23	0	0	191	13,9
4,1	AmN - BmN (a = 1)	56	23	0	-81	-2	-0,3
4,2	AmN - BmN (a = 2)	112	23	0	-81	54	5,5
4,3	AmN - BmN (a = 3)	168	23	0	-81	110	7,9

Tabelle 2: Änderungen des Primärenergieaufwands durch Schrottvorwärmung (positive Zahlenwerte) und Abgasnachverbrennung (negativ Zahlenwerte) in kWh/t_{St} sowie Bewertungszahlen bei der Gegenüberstellung verschiedener Anlagenvarianten.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In dem vorliegenden Beitrag wird aufgezeigt, ob durch Schrottvorwärmung im Schacht eines Einzel- bzw. Doppelschachtofens auch bei zusätzlichem Energieaufwand für eine thermische Nachbehandlung (Nachverbrennung) der austretenden Schachtabgase insgesamt Energie bei der Elektrostahlerzeugung eingespart werden kann.

Hierbei wird in einem ersten Schritt die Hintereinanderschaltung der Komponenten Schacht und Nachbrennkammer betrachtet und anhand einer Bewertungszahl für verschiedene jeweils augenblicklich herrschende Temperaturen des aus dem Ofengefäß und aus dem Schacht austretenden Abgases dargelegt, daß die Schrottvorwärmung auch bei zusätzlichem Energieaufwand für die Nachverbrennung grundsätzlich zur Einsparung von Energie führen kann.

Um die insgesamt (integral) während einer Schmelze durch Schrottvorwärmung im Schacht eingesparte Energie ermitteln zu können, ist darüberhinaus auch der Prozeßablauf im Ofengefäß zu berücksichtigen und somit alle drei Komponenten - Ofengefäß, Schacht und Nachbrennkammer - mit in die Betrachtung einzubeziehen. Daher wurden in einem zweiten Schritt Modellrechnungen zum Energieeinsatz bei verschiedenen Anlagenvarianten mit den Komponenten Ofengefäß, Schacht und Nachbrennkammer durchgeführt. Hierbei wurden die folgenden Varianten unterschieden:

- Ofengefäß als Einzelmodul (Fall AoN),
- Kombination aus Ofengefäß und Nachbrennkammer (Fall AmN),

- Kombination aus Ofengefäß und Schacht (Fall BoN) und
- Kombination aus Ofengefäß, Schacht und Nachbrennkammer (Fall BmN).

Beispiele von Bilanzen, die anhand von Ergebnissen durchgeführter Modellrechnungen erstellt wurden, zeigen, daß für die Nachverbrennung der Abgase aus dem Ofengefäß ein Mehraufwand an Primärenergie von 12 kWh/t_{St} benötigt wird. Demgegenüber ist für die Nachverbrennung der aus dem Schacht austretenden Abgase mit 93 kWh/t_{St} deutlich mehr Primärenergie erforderlich.


Wird die Schrottvorwärmung im Schacht ohne und mit Abgasnachverbrennung bewertet, so zeigen die Beispielbilanzen, daß ohne Berücksichtigung der Nachbrennkammer Primärenergieeinsparungen von bis zu 191 kWh/t_{St} erreicht werden. Wird die Abgasnachverbrennung mit in die Bewertung einbezogen, ergeben sich Einsparungen an Primärenergie bis 110 kWh/t_{St}.


Werden der Einzel- und der Doppelschachtofen miteinander verglichen, sind folgende Aspekte festzuhalten:

Der Doppelschachtofen führt gegenüber dem Einzelschachtofen durch Verkürzung der tap-to-tap-time zur Erhöhung der Produktionsleistung. Da die beiden Einzelschachtofen einer Doppelschachtofenanlage über einen Verbindungskanal miteinander verbunden sind, besteht die Möglichkeit, durch Öffnen der Verbindungsklappe zwischen den beiden Öfen die sensible Energie der Abgase des ersten Ofens, in dem gerade „geschmolzen“ bzw. „überhitzt“ wird, zusätzlich zur Vorwärmung des Schrotts im Schacht des zweiten Ofens zu nutzen. Hierbei wird jedoch auch mehr Falschluff durch vorhandene Öffnungen im Ofen angesaugt, wodurch der Schrott dann im Vergleich zum Einzelschachtofen weniger vorgewärmt wird. Die hier berechneten Einsparpotentiale für den Einzelschachtofen werden somit durch einen Doppelschachtofen nicht weiter erhöht, sondern eher vermindert.

Beim Doppelschachtofen kann jedoch im Vergleich zum Einzelschachtofen der Energieeinsatz weiter vermindert werden, wenn das Abgas des ersten Ofens, in dem gerade der Schmelz- bzw. Überhitzungsvorgang abläuft, zusammen mit dem „kälteren“ Abgas des zweiten Ofens, in dem zur selben Zeit die Schrottvorwärmung stattfindet, nachverbrannt wird. Hierdurch verringert sich der Energieeinsatz für die thermische Nachbehandlung der Schachtabgase. Inwieweit in diesem Fall die berechneten Einsparpotentiale des Einzelschachtofens erhöht werden, ist jedoch noch in einem weiteren Teilschritt quantitativ zu untersuchen.

Prof. Dr.-Ing.  Dr.-Ing. E.H. R. Jeschar


Dipl.-Ing. C. Weichert


Prof. Dr.-Ing. R. Scholz

8 Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen, Formelzeichen und Indizes

Abkürzungen

AmN	Betriebsweise ohne Schacht und mit Nachbrennkammer
AoN	Betriebsweise ohne Schacht und ohne Nachbrennkammer
AP	Abstichphase
BmN	Betriebsweise mit Schacht und mit Nachbrennkammer
BoN	Betriebsweise mit Schacht und ohne Nachbrennkammer
BR	Bilanzraum
i.N.	im Normzustand
IP	Inaktive Phase
LP	Leerphase
MP	Modellphase
PP	Prozeßphase
SP	Schmelzphase
ÜP	Überhitzungs- bzw. Feinungsphase

Formelzeichen

Lateinische Buchstaben

a	Primärenergiebewertungszahl
A	Oberfläche
c	spezifische (isobare) Wärmekapazität
E	Energie
\dot{E}	Energiestrom
f	spezifische Oberfläche
h_u	Heizwert
h	Enthalpie
\dot{H}	Enthalpiestrom
k	Wärmedurchgangskoeffizient
K	Konstante
l	Luftbedarf
m	Masse
\dot{m}	Massenstrom
P	Leistung
\dot{Q}	Wärmestrom
t	Zeit

V	Volumen
\dot{V}	Volumenstrom
z	Höhe
Z	Bewertungszahl

Griechische Buchstaben

α	Wärmeübergangskoeffizient
Δ	Differenz
η	Wirkungsgrad
λ	Luftzahl
ρ	Dichte
ϑ	Temperatur

Indizes

a	aus, Austritt
A	Abgas
An	Anthrazit
AmN	Betriebsweise ohne Schacht und mit Nachbrennkammer
AoN	Betriebsweise ohne Schacht und ohne Nachbrennkammer
AP	Abstichphase
BmN	Betriebsweise mit Schacht und mit Nachbrennkammer
BoN	Betriebsweise mit Schacht und ohne Nachbrennkammer
C	Kohlenstoff
CaO	Kalk
CO	Kohlenmonoxid
CO_2	Kohlendioxid
e	ein, Eintritt
el	elektrisch
EG	Erdgas
FL	Falschluff
ges	gesamt
GB	Gefäßbrenner
H	Herd
i	Zähler
IP	Inaktive Phase
K	Kraftwerk
KW	Kühlwasser

<i>L</i>	Luft	<i>SB</i>	Schachtbrenner
<i>La</i>	Lanze	<i>Sch</i>	Schrott
<i>LP</i>	Leerphase	<i>Schl</i>	Schlacke
<i>min</i>	mindest	<i>Schm</i>	Schmelze
<i>mN</i>	mit Nachbrennkammer	<i>SP</i>	Schmelzphase
<i>mS</i>	mit Schacht	<i>St</i>	Stahl
<i>MP</i>	Modellphase	<i>th</i>	thermisch
<i>n</i>	Anzahl der Zellen (Bilanz- räume)	<i>u</i>	Umgebung
<i>N</i>	Nachbrennkammer	<i>ÜP</i>	Überhitzungsphase
<i>oN</i>	ohne Nachbrennkammer	<i>V</i>	Verlust
<i>oS</i>	ohne Schacht	<i>W</i>	Wand
<i>O₂</i>	Sauerstoff	<i>zu</i>	zugeführt
<i>O</i>	Ofengefaß	<i>0,1,2,...</i>	Zahlen
<i>pr</i>	primär		
<i>S</i>	Schacht		

9 Literaturverzeichnis

1. Heinen, K.-H., Siegert, H., Poltier, K. & Timm, K. Einsatz von Erdgas-Sauerstoff-Brennern an Hochleistungslichtbogenöfen, *Stahl und Eisen*, 1983, 18, 41-47.
2. Broome, K.A. & Welbourn, B.C. The Development and Operation of Oxy-Coal Burners for Assisted Melting in Electric Arc Furnaces. Europäischer Elektrostahl Kongreß, Florenz, 29.9-1.10.1986.
3. Köhle, S. Einflußgrößen des elektrischen Energieverbrauchs und des Elektrodenverbrauchs von Lichtbogenöfen, *Stahl und Eisen*, 1992, 11, 59-67.
4. Ameling, D., Baum, R., Köhle, S. & Kreutzer, W. Entwicklungsrichtungen bei der Elektrostahlerzeugung in Lichtbogenöfen, *Stahl und Eisen*, 1981, 4, 27-37.
5. Adolph, H., Devaux, M., Klein, K.-H., Lepoutre, E. Paul, G. & Vuillermoz, J.C. A New Concept for Using Oxy-Fuel Burners and Oxygen Lances to Optimize Electric Arc Furnace Operation, *Iron and Steelmaker*, 1989, 2, 29-33.
6. Perrin, N.G. & Vonesh, F.A. Post-combustion for the electric arc furnace, *Iron and Steel Engineer*, 1995, 30-32.
7. Daughtridge, G. & Mathur, P. Oxygen injection for effective post-combustion in the EAF, 51st Electric Furnace Conference Proceedings, Washington, 1993, 299-302.
8. Pfeifer, H. Stoff- und Energiebilanz, Kapitel 2.9, *Elektrostahlerzeugung*, ed. K.-H. Heinen, pp 112-127, Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 1997.
9. Kishida, T., Ukai, A., Sugiura, S. & Asano, S. Scrap preheating by exhaust gas from electric arc furnaces, *Iron and Steel Engineer*, 1983, 11, 54-61.
10. Dening, W., Klein, K.-H., Paul, G. & Schindler, J.E. Schrottvorwärmung bei den Badischen Stahlwerken, *Stahl und Eisen*, 1984, 2, 26-28.
11. Schermer, K. Verminderung des Einschmelzstromverbrauches des Lichtbogenofens durch Ausnutzung der im Abgas enthaltenen Wärme zum Schrottvorwärmen, *Elektrowärme International*, 1981, B3, 138-142.
12. Neumann, F., Len, H., Pfach, R. & Brusa, U. Das BBC-Brusa-Verfahren zum Schmelzen von Stahl, *Stahl und Eisen*, 1975, 1, 16-23.
13. Tomizawa, F. & Howard, E.C. Scrap Preheating with a Clean House Enclosure and Associated Operation Benefits, *Iron and Steelmaker*, 1985, 11, 30-42.
14. Watanabe, H., Iguchi, M. & Maki, T. Scrap Preheater for Electric Arc Furnace, *Iron and Steel Engineer*, 1983, 4, 45-50.
15. Vallony, J.A., Fuse, T. & Nakamura, S. The Consteel process: An integral scrap preheater for the EAF, *Steel Times*, 1993, 5, 222-223.
16. Vallomy, J.A. The Consteel Process - Continuous Steelmaking in the Electric Arc Furnace in the USA, *Metallurgical Plant and Technology*, 1989, 6, 20-25.
17. Berger, H. & Mittag, P. Der Comelt-Elektrolichtbogenofen mit schräg angeordneten Seitenelektroden, *Stahl und Eisen*, 1995, 9, 53-58.
18. Hofman, W. & Reichelt, W. Contiarc - ein energieoptimiertes und umweltschonendes Schrottschmelzverfahren, *Stahl und Eisen*, 1996, 5, 89-92.
19. Clayton, J., Ehle, J., Knapp, H. & Twiselton, J.C. The Sheerness Shaft Furnace, 4th European Electric Steel Congress, Madrid, 1992, 307-316.
20. Eng, B. & Twiselton, J.C. The CO-Steel Sheerness Shaft Furnace, Environmental Implications, 51st Electric Furnace Conference and 12th Process Technology Conference, Washington, D.C., 1993, 91-96.

21. Beirer, M. Le nouveau four double cuve avec shaft de la S.A.M. Montereau, European Fast Furnace Conference, Mailand, 1994.
22. Beirer, M., Ehle, J. & Knapp, H. Operational Results of a Double Shaft Furnace at SAM Montereau, 52nd Electric Furnace Conference, Nashville, 1994, 49-54.
23. Ehle, J., Knapp, H. & Kuhn, R. Neue Entwicklungen bei Drehstrom-Lichtbogenöfen, *Stahl und Eisen*, 1994, 6, 111-113.
24. Prüm, C., Blondelot, E. & Knaff, F. Double shell furnace with shaft at ARES Schiffflange, 5th European Electric Steel Congress, Paris, 1995, 457-461.
25. Hofmann, W. Schrottvorwärmung, Chapter 6.4.5, *Elektrostahlerzeugung*, ed. K.-H. Heinen, pp 354-361, Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 1997.
26. Ameling, D., Baare, R.-D., Bauer, H.-G., Grubert, K. & Schnitzer, H. Lichtbogenofen mit exzentrischem Bodenabstich: eine neue Methode für schlackenfreien Abstich, *Stahl und Eisen*, 1984, 1, 7-10.
27. Pesce, L.P., Todzy, H. & Schnitzer, H. Slag-Free Tapping and Bottom Blubbing in Electric Steelmaking, *Steel and Metals Magazine*, 1989, 8, 591-594.
28. Ameling, D., Petry, J., Sittard, M., Ullrich, W. & Wolf, J. Untersuchungen zur Schaum-schlackenbildung im Elektrolichtbogenofen, *Stahl und Eisen*, 1986, 11, 45-50.
29. Schmeiduch, G. & Oeters, F. Einfluß einiger Betriebsparameter auf den Feuerfestverschleiß im Elektrolichtbogenofen, *Stahl und Eisen*, 1980, 20, 1188-1194.
30. Scholz, R. & Weichert, C. Wassergekühlte Bauteile, Chapter 4.3, *Elektrostahlerzeugung*, ed. K.-H. Heinen, pp 176-193, Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 1997.
31. Altfeld, K. & Schneider, A. Energiebilanzen von Elektrolichtbogenöfen - Auswirkungen wassergekühlter Ofenelemente, *Stahl und Eisen*, 1982, 20, 35-40.
32. Brod, H., Kempkens, F. & Strohschein, H. Energierückgewinnung aus einem UHP-Elektrolichtbogenofen, *Stahl und Eisen*, 1998, 5, 229-238.
33. Ameling, D. Heinen, K.-H., Kreutzer, H.W., Schneider, A. & Strohschein, H. Metallurgie und Verfahrenstechnik der Elektrostahlerzeugung - Entwicklung und heutige Bedeutung, *Stahl und Eisen*, 1986, 1, 35-43.
34. Fett, F.N., Heinen, K.-H. & Pfeifer, H. Möglichkeiten zur Verbesserung der Energiebilanz des Lichtbogenofens, *Elektrowärme International*, 1988, B2, 71-78.
35. Fett, F., Pfeifer, H. & Siegert, H. Energetische Untersuchung eines Hochleistungslichtbogenofens, *Stahl und Eisen*, 1982, 9, 57-61.
36. Heiligenstaedt, W. *Wärmetechnische Rechnungen für Industrieöfen*, Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf, 1966.
37. Alt, R., Jeschar, R. & Specht, E. Schmelzen, Chapter 6.4, *Grundlagen der Wärmeübertragung*, ed. R. Alt, R. Jeschar & E. Specht, pp 311-324, Viola-Jeschar-Verlag, Goslar, 1990.
38. Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissions-schutzgesetzes (Verordnung über Verbrennungsanlagen für Abfälle und ähnliche brennbare Stoffe - 17. BImSchV), 23. Nov. 1990.
39. Klein, K.-H. & Schindler J.E. Metallurgie bei Schrotteinsatz, Chapter 9.3, *Elektrostahlerzeugung*, ed. K.-H. Heinen, pp 473-502, Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 1997.
40. VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, 5. Auflage, ed. VDI, GVC, VDI Verlag, Düsseldorf, 1988.