Vermeidung von Abfällen durch abfallarme Produktionsverfahren

Reststoffe aus Kupolofen-Schmelzanlagen

im Auftrag des
Umweltministeriums Baden-Württemberg

Wolfgang Binninger

FICHTNER GmbH & Co. KG
Sarweystraße 3
70191 Stuttgart
Tel. 0711/8995-0

Stuttgart, August 1994

Herausgeber:
ABAG-Abfallberatungsagentur
Geschäftsbereich der
SBW-Sonderabfallentsorgung Baden-Württemberg GmbH
Stauferstraße 15
70736 Fellbach
Telefon 07 11 / 95 19 11-0
Telefax 07 11 / 95 19 11-20

August 1994

Gedruckt auf: weiß Recycling (Inhalt)
weiß mattgestrichen Offset chlorfrei gebleicht (Umschlag)

Gesamtherstellung: Oertel + Spörer, Reutlingen

Alle Rechte der Verbreitung, auch durch Film, Funk und Fernsehen, fotomechanische Wiedergabe, Tonträger jeder Art, auszugsweisen Nachdruck oder Einspeicherung und Rückgewinnung in Datenverarbeitungsanlagen aller Art, sind vorbehalten.

Vorwort

In Baden-Württemberg sind 1992 440 000 Tonnen klassische Sonderabfälle angefallen. Mit dieser Menge könnte man einen Güterzug beladen, der von Freiburg bis Frankfurt reichen würde. Diese Sonderabfälle sind Rückstände unserer Wohlstandsgesellschaft. Wir alle erzeugen durch unser Konsumverhalten und unsere Wirtschaftsweise täglich Sonderabfälle.

Unser vorrangiges Ziel ist es, diese Menge von Sonderabfällen deutlich zu reduzieren. Die Vermeidung von Abfällen und Sonderabfällen hat absolute Priorität. Um dies zu erreichen, ist ein Umdenken in den Betrieben und in der Gesellschaft erforderlich.

Zu einer ökologischen Neuorientierung von Wirtschaft und Gesellschaft gehört unabdingbar der Einstieg in die Kreislaufwirtschaft. Der Hauptansatz hierfür muß das Produkt sein; wir müssen die Verantwortung des Herstellers für sein Produkt einfordern, und zwar von der Wiege bis zur Bahre, von der Rohstoffauswahl bis hin zur Entsorgung. Dieser produktorientierte Ansatz muß das bisher oft vorherrschende „End-of-the-pipe"-Denken ersetzen. Bereits im Vorfeld der Abfallentstehung müssen bei der Produktentwicklung und -konstruktion Rohstoffschonung und Abfallvermeidung entscheidende Aspekte sein. Ein Optimum – kein Maximum – von Gütern und Dienstleistungen muß mit einem Minimum an Energie- und Rohstoffverbrauch und Umweltbelastung erbracht werden. Umweltschutz muß im Kopf des Ingenieurs anfangen. Die seit langem geplanten Rücknahmeverordnungen des Bundes für Autos, Elektro- und Elektronikgeräte, Batterien, Druckerzeugnisse usw. sind meines Erachtens ein wichtiger Schritt auf dem Weg in die Kreislaufwirtschaft.

Mit der 1991 eingerichteten Abfallberatungsagentur (ABAG) stellt das Land den Betrieben ein Beratungsinstrument zur Seite. Die Abfallberatungsagentur soll zunächst abfallarme Produktionsverfahren erkunden und deren Weiterentwicklung in Form von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben initiieren. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen auf dem Wege der individuellen Beratung und der allgemeinen Information sowohl an die gewerbliche Wirtschaft als auch an die technischen Fachbehörden weitergegeben werden.

Ein wesentlicher Eckpfeiler der gegenwärtigen Arbeit der Abfallberatungsagentur ist es, die im Auftrag des Umweltministeriums durchgeführten Untersuchungen zum Thema „Vermeidung von Abfällen durch abfallarme Produktionsverfahren" zu betreuen und fortzuführen.

Im Rahmen der vorliegenden Broschüre werden zunächst die prinzipiellen Möglichkeiten zur Vermeidung, Verminderung und Verwertung von Reststoffen aus Kupolofen-Schmelzanlagen in Eisengießereien aufgezeigt. Aufbauend auf diesen allgemeinen Grundlagen werden anschließend für einen untersuchten Betrieb konkrete Vorschläge zur betriebsinternen Vermeidung und externen Verwertung von Reststoffen erarbeitet und deren Wirtschaftlichkeit betrachtet. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, daß die dargestellten Maßnahmen nicht nur ökologisch, sondern in der Regel auch ökonomisch sinnvoll sind.

Ich hoffe und wünsche, daß die von der Abfallberatungsagentur vorgelegte Broschüre viele betroffene Betriebe dazu ermuntert, die darin enthaltenen Vorschläge in die Tat umzusetzen.

Harald B. Schäfer
Umweltminister
Baden-Württemberg

Inhaltsverzeichnis

0 Kurzfassung 8

1 Einführung 11

Teil A: Stand der Kupolofen-Schmelztechnologie 14

2 Grundlagen der Kupolofen-Schmelztechnologie 14
2.1 Übersicht zur Eisenmetallerschmelzung und Gußeisenwerkstoffe 14
2.1.1 Einteilung der Metalle in Gießereibetrieben 14
2.1.2 Gußeisenwerkstoffe 16
2.1.2.1 Gußeisen mit Lamellengraphit (GGL) 16
2.1.2.2 Gußeisen mit Kugelgraphit (GGG) 17
2.1.2.3 Temperguß (GT) 17
2.2 Schmelz- und Warmhalteaggregate 17
2.2.1 Schmelzprinzipien 17
2.2.2 Einsetzbare Ofenarten in Schmelzbetrieben für Eisenguß 18
2.2.3 Kupolofen-Schmelzbetrieb und Nebenschmelzaggregate 19
2.2.4 Energieeinsatz 20
2.3 Verfahrensprinzip und Grundgesetze des Kupolofens 22
2.3.1 Koks und dessen wichtige Begleitstoffe 22
2.3.2 Hauptreaktionen zwischen Kohlenstoff und Sauerstoff 23
2.3.3 Gichtgas 24
2.3.4 Wärmeübertragung und Energiebilanz des Kupolofens 24
2.3.5 Beziehung zwischen Kokszusatz, Windmenge und Schmelzleistung 25
2.4 Metallurgie im Kupolofen 26
2.4.1 Einsatzstoffe und Gußeigenschaften 27
2.4.2 Oxidationsverhalten und Überhitzung 27
2.4.3 Kohlenstoff 28
2.4.4 Schwefel 28
2.4.5 Silizium 30
2.4.6 Phosphor 30
2.5 Ofenbetrieb, Betriebssysteme und Komponenten der Kupolofen-Schmelzanlagen 31
2.5.1 Kupolofen-Gesamtanlage 31
2.5.2 Gattierung der Einsatzstoffe im Kupolofen 34
2.5.2.1 Metallische Einsatzstoffe 34
2.5.2.2 Brennstoffe 35
2.5.2.3 Legierungs- und Zuschlagstoffe 35
2.5.2.4 Schlackenbildner 36
2.5.2.5 Gattierungsbeispiele 36
2.5.3 Ofenauslegung 37
2.5.3.1 Heißwind oder Kaltwind 37
2.5.3.2 Ofenauskleidung bzw. Zustellung 38
2.5.3.3 Ofenabdichtung 38
2.5.3.4 Schachthöhe 39
2.5.3.5 Langzeitbetrieb durch futterlosen Ofenschacht 39

2.5.3.5 Langzeitbetrieb durch futterlosen Ofenschacht . . . 39
2.5.3.6 Gichtgasreinigung . . . 40
2.5.3.7 Siphone zum getrennten Abstich des Gußeisens und der Schlacken . . . 40
2.5.3.8 Mantelkühlung . . . 42
2.5.3.9 Entstaubungssysteme . . . 43
2.5.3.10 Schlackenaufbereitung . . . 46
2.6 Winderhitzersystem . . . 46
2.7 Speichern und Warmhalten . . . 46
2.8 Anlage zur Nutzung der Abwärme mit Thermoöl . . . 47

3 Abfallarten – Entstehung, Aufkommen und Entsorgungsweg . . . 48
3.1 Kupolofenschlacken . . . 48
3.2 Rinnenofenschlacken . . . 50
3.3 Gichtgasstäube . . . 50
3.4 Ofenausbrüche . . . 51
3.5 Koksgrus bzw. Koksabrieb . . . 52
3.6 Sonstige Stäube oder Filterstäube . . . 52

4 Vermeidung und Verwertung von Abfällen/Reststoffen aus Kupolofen-Schmelzanlagen . . . 54
4.1 Vermeidung von Reststoffen durch Änderung der Verfahrensparameter in den Kupolöfen . . . 54
4.2 Kupolofenvarianten zur Vermeidung von Reststoffen . . . 55
4.2.1 Kaltwind-Kupolofen – Basissystem – (1) . . . 59
4.2.2 Kupolofen mit Sekundärwind (2) . . . 59
4.2.3 Kupolofen mit sauerstoffangereichertem Wind oder Sauerstoffdirekteindüsung (3) . . . 61
4.2.4 Konventioneller Heißwind-Kupolofen (4) . . . 62
4.2.5 Futterloser, wassergekühlter Heißwind-Kupolofen (5a) . . . 63
4.2.6 Futterloser, wassergekühlter Langzeit-Heißwind-Kupolofen (5b) . . . 64
4.2.7 Koksloser Kupolofen (6) . . . 65
4.2.8 Gasgefeuerter Koks-Kupolofen (7) . . . 67
4.2.9 Zusätzliche Vermeidungsmaßnahmen . . . 68
4.2.9.1 Koksstückgröße . . . 69
4.2.9.2 Induktionsöfen als Vorherd zum Sammeln, Warmhalten und Duplizieren . . . 69
4.3 Aufbereitung und Verwertung der Abfälle/Reststoffe . . . 70
4.3.1 Erarbeitung bundeseinheitlicher Regelungen für die Verwertung von Reststoffen . . . 72
4.3.2 Aufbereitung von Kupolofenschlacken . . . 72
4.3.2.1 Trockene Verfahren (mech. Zerkleinerung) . . . 72
4.3.2.2 Nasse Verfahren . . . 73
4.3.2.3 Verwertung der Kupolofenschlacken . . . 75
4.3.3 Rinnenofenschlacke . . . 75
4.3.3.1 Aufbereitung der Rinnenofenschlacken . . . 75
4.3.3.2 Verwertung der Rinnenofenschlacken . . . 76
4.3.4 Gichtgasstäube . . . 76
4.3.4.1 Aufkonzentrieren der Gichtgasstäube im Kupolofen . . . 76
4.3.4.2 Externe Aufbereitung der Gichtgasstäube im Wälzrohr . . . 77
4.3.5 Ofenausbrüche aus Rinnenofen und Siphonen . . . 77
4.3.6 Koksgrus . . . 78
4.3.7 Sonstige Stäube oder Filterstäube . . . 78

Teil B: IST-Analyse des untersuchten Betriebes 80

5 Beschreibung des untersuchen Betriebes 80
5.1 Leistungsangebot 80
5.2 Mitarbeiter 80
5.3 Gebäude und Lage der Schmelzanlage 80
5.4 Maschinelle und apparative Ausstattung 80
5.5 Ablauf der Arbeiten 82
5.6 Beschreibung der Kupolofen-Schmelzanlage 83
5.6.1 Vorratslager/Gattierung/Begichtung 84
5.6.2 Futterloser Langzeit-Heißwind-Kupolofen 85
5.6.3 Kühlwasserkreislauf 87
5.6.4 Rekuperator 87
5.6.5 Filteranlagen 88
5.6.6 Absaugung (Rinnenofenanlage) 88

6 Bilanzierung der Stoffströme 89

Teil C: Betriebsbezogene Konzepte zur Vermeidung und Verwertung von Abfällen/Reststoffen 98

7 Bereits durchgeführte Maßnahmen zur Vermeidung und Verwertung von Abfällen/Reststoffen 98
7.1 Vermeidung durch den Ersatz veralteter Kupolöfen durch einen futterlosen Langzeit-Heißwind-Kupolofen 98
7.2 Verwertung der Kupolofenschlacken durch Aufbereitung 98
7.2.1 Aufbereitung der Schlacken durch nasse Granulierung 98
7.2.2 Aufbereitung der Schlacken durch Zerkleinerung 99
7.3 Aufkonzentration der zinkhaltigen Gichtgasstäube durch Wiedereindüsung 99
7.4 Verwertung von Koksgrus bzw. Koksstäuben 100
7.5 Vermeidung von Reststoffen durch Energieeinsatzoptimierung 100
7.6 Reststoffentstehung durch emissionsmindernde Maßnahmen 100

8 Konzepte zur Vermeidung und Verwertung weiterer Abfälle/Reststoffe 101
8.1 Verwertung der Rinnenofenschlacken 101
8.2 Bewältigung der Schlackenabsatzprobleme als Voraussetzung zur Verwertung . 101
8.3 Vermeidung von sonstigen Stäuben durch den Einsatz von möglichst sauberen Einsatzstoffen 102
8.4 Verminderung des Kokszusatzes durch Sauerstoffeindüsung 102
8.5 Verringerung der Schlackenmenge durch Optimierung der Schlackenarbeit . . 102
8.6 Verringerung der Koksmengen durch Ölzusatzfeuerung 102
8.7 Verringerung der Koksmengen durch Erdgaszusatzfeuerung 103
8.8 Verwertung der sonstigen Stäube durch Schadstoffentfrachtung und Inertisierung 103

9 Entscheidungskriterien zur Durchführung von Maßnahmen zur Vermeidung und Verwertung von Abfällen 104
9.1 Vermeidungs- und Verwertungspotentiale 104
9.2 Technische Realisierbarkeit und Zumutbarkeit 104
9.3 Organisatorische Integration und Akzeptanz 104
9.4 Bewertung der Wirtschaftlichkeit 105
9.5 Entsorgungskosten 105
9.6 Aufbereitungskosten im untersuchten Betrieb zur Verwertung der Reststoffe . . 107

Literaturverzeichnis 108

Abbildungsverzeichnis 112

Tabellenverzeichnis 113

Anhang 114

0 Kurzfassung

In etwa 100 Gießereien in Baden-Württemberg wurden 1989 ca. 516 000 t Eisen-, Stahl- und Temperguß von ca. 10 000 Beschäftigten hergestellt. Die erzeugte Menge entspricht etwa 15% der Gesamtmenge in der alten Bundesrepublik. Ungefähr die Hälfte der Gesamtproduktion an Eisenguß in Baden-Württemberg wird in Kupolöfen erschmolzen. Jährlich sind insgesamt etwa 40 000 t Schlacken aus der Gußeisenproduktion zu entsorgen, wovon der Anteil aus Kupolofen-Anlagen ca. 30 000 t beträgt.

Der Bericht beschreibt den Stand der Technik zur Vermeidung und Verwertung von Kupolofenschlacken sowie der sonstigen wesentlichen Abfälle/Reststoffe aus dem Schmelzbetrieb (Teil A) und einen untersuchten Kupolofenbetrieb (Teil B und C).

In **Kupolofen-Schmelzanlagen** wird Flüssigeisen (Basiseisen) aus Eisenträgern, Legierungszuschlägen und Schmelzhilfsmitteln unter Verwendung von Koks als Brennstoff erschmolzen und in den Formanlagen der Gießereien zu Gußprodukten vergossen. Wichtigste Gußsorten aus Kupolöfen sind Lamellengraphitguß (GGL), Temperguß (GT) und Kugelgraphitguß (GGG).

Als **Einsatzstoffe** werden **Eisenträger** wie Roheisenbarren, Stahlschrott, Kreislaufmaterial, Spänebriketts und Blechpakete (teilweise verzinkt), **Legierungsstoffe** wie Ferromangan und Ferrosilizium, **Zuschläge** wie Koks, Kalkstein, Kies und Basalt sowie **Verbrennungsmedien/ Hilfsstoffe** wie Heißwind, Sauerstoff, Erdgas, Verbrennungsluft, Kühlluft, Konditionierungswasser, Kühlwasser und Stampfmassen verwendet.

Der **Arbeitsablauf** in den Schmelzanlagen beginnt mit der Gattierung, in der die spezielle Rezeptur für die vielfältigen Gußeisenvarianten fachkundig aus den Einsatzstoffen und Kupolofenkoks zusammengestellt und in Chargen in den Kupolofen eingeworfen wird. Die Chargen werden kontinuierlich niedergeschmolzen. Nach Erreichen der Abstichtemperatur wird das Flüssigeisen im Siphon von der Schlacke getrennt und gelangt entweder in einen nachgeschalteten Induktionsrinnenofen zum Warmhalten oder in einen Induktions-Tiegelofen zur Nachbehandlung (Duplizieren) des Flüssigeisens. Das Gichtgas wird verbrannt, die erzeugte Wärme im Heißwind genutzt.

Die wesentlichen **Kupolofen-Grundbauformen** sind die Kaltwind-Kupolöfen mit Schmelzleistungen bis etwa 10 t/h und zunehmend Heißwind-Kupolöfen mit Schmelzleistungen bis zu 60 t/h. Bei Kaltwind-Kupolöfen wird der Wind nicht vorgewärmt. In den Heißwind-Kupolöfen wird der zugeführte Wind im Winderhitzer auf ca. 600 °C aufgeheizt. Dies kann durch Fremd- oder Eigenbeheizung erfolgen. Bei Fremdbeheizung wird Öl oder Gas (ohne Gichtgasverwertung) verwendet.

Als wichtigste **Abfallarten** aus Kupolofen-Schmelzanlagen sind die **Schlacken** aus Kupolöfen sowie den nachgeschalteten Induktionsrinnenöfen und Induktionstiegelöfen, **Gichtgasstäube** aus der Abluft, **Ofenausbrüche** aus Kupolofen, Rinnenofen-Tiegeln und -Siphonen sowie die **Koksgruse** zu nennen. Außerdem werden die verschiedenen Staubquellen wie Förderbänder, Gattierung, Rinnenofen abgesaugt und als **sonstige Stäube** in den nachgeschalteten zentralen Filteranlagen abgeschieden.

Die **Vermeidung** von Reststoffen ist vor allem durch Verfahrensumstellungen im Kupolofen gegeben. Ausgehend vom Kaltwind-Kupolofen ohne zusätzliche Verfahrensumstellungen (Basissystem) können bestenfalls, bezogen auf die Basisvariante, durch Sekundär- und Sauerstoffeindüsung 20 bis 40%, durch Heißwindeindüsung und futterlose Ausführung 30 bis 50% und bei dem Einsatz von kokslosen Kupolofenvarianten 40 bis 60% des Reststoffanfalls vermieden werden, wobei die wechselseitigen Auswirkungen der verschiedenen Verfahrensmodifika-

tionen, die Fahrweise, die zu erschmelzende Gußart sowie die Qualifikation des Betriebspersonals berücksichtigt werden müssen.

Die **Verwertung der Schlacken als Hauptreststoff einer Kupolofenanlage** ist im Straßenbau als Unterbaumaterial, als Beimengung zu natürlichen Mineralstoffgemischen sowie in der Bauindustrie für Fertigbauteile möglich.

Bei dem **untersuchten Betrieb** handelt es sich um einen Hersteller von Gußteilen für die Automobilindustrie und Rohrfittings, bei dem im Untersuchungszeitraum 1990/91 jährlich etwa 100 000 t Flüssigeisen aus der Schmelzanlage für ca. 60 000 t guten Guß bereitgestellt wurden. In der Schmelzanlage sind 20 Angestellte im 3-Schicht-Betrieb beschäftigt.

Im untersuchten Betrieb werden **bereits folgende Maßnahmen zur Vermeidung und Verwertung durchgeführt:** Die einschneidendste Maßnahme zur Vermeidung von Abfällen ist der neu installierte **futterlose Langzeit-Heißwind-Kupolofen,** mit dem vor allem die **Ofenausbruchmengen** um etwa 70% gesenkt werden. Aber auch alle anderen Abfälle entstehen in geringeren Mengen. Die **Kupolofenschlacke** wird bereits mit Wasser granuliert. Die Granulierungsanlage als Voraussetzung zur Verwertung hat ihren Probebetrieb bestanden. Da ein Verwerter für diese Schlackengranulate bisher nicht gefunden werden konnte, ist der Betrieb in Verhandlungen mit dem Baustoffhandel getreten. Dieser will die Schlacke selbst mechanisch in Brechern zerkleinern. Die **Gichtgasstäube** werden durch betriebsinterne Wiedereindüsung auf einen Zinkgehalt über 16% aufkonzentriert. Das Zink wird von einem externen Abnehmer im Wälzrohrverfahren gewonnen, wofür der untersuchte Betrieb ca. 200 DM/t bezahlt. Der Wälzrohrbetreiber bietet das gewonnene hochreine Zink der zinkverarbeitenden Industrie an. Die **Koksgruse** sind Koksabriebe mit Korngrößen unter 6–10 mm von den Förderbändern, der Gattierung und der Ofenkopfabsaugung. Diese werden in Big Bags verpackt und an eine Kokerei verkauft, die diese als Zusatzbrennstoff energetisch verwertet.

Die **Kosten** zur Deponierung der **Schlacken** betragen im Untersuchungszeitraum ca. 15 DM/t; bis 1995 sind dafür voraussichtlich bis 180 DM/t zu bezahlen. Die Verwertung der Schlacken kostet etwa 45 bis 95 DM für Granulierung, Transport und Abnahmegebühr an den Verwerter. Für die **Gichtgasstäube** entstehen Kosten bei der Deponierung von 200 bis 250 DM/t inklusive Landesabfallabgabe. Die Verwertungskosten betragen 190 bis 300 DM/t für die interne Aufkonzentration, externe Zinkgewinnung und Transport. Nur Koksgruse können mit einem Erlös von ca. 15% der Koksbeschaffungskosten verwertet werden.

Weitere Maßnahmen zur Vermeidung und Verwertung von Abfällen/Reststoffen, die für den untersuchten Betrieb geprüft werden müssen, sind Sauerstoffeindüsung, Verbesserung der Schlackenarbeit durch optimierte Nutzung der Schlackenbildner, Ölzusatzfeuerung, Erdgaszusatzfeuerung und Schadstoffentfrachtung.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Vermeidungs- und Verwertungsmöglichkeiten für Abfälle/Reststoffe aus dem Kupolofenbetrieb.

Abfall-/Reststoffart und Verwertungspotential (in Prozent)	**Generelle Vermeidung (für alle Abfälle/Reststoffe)**	**Behandlungsmaßnahmen**	**Stoffliche Verwertung/ Einsatzgebiete**
Kupolofenschlacke (80–100)	Durch den Einsatz von Verfahrensmodifikationen wie – **Windvorwärmung** – **Sekundärlufteindüsung** – **Ölzusatzfeuerung** – **Gaszusatzfeuerung** und – **Optimierung der Koksgrößen** wird die Kokseinsatzmenge verringert. Dadurch verringern sich alle Reststoffmengen. **Die Vermeidung von Reststoffen in Kupolöfen hängt also wesentlich von der Einsparung der einzusetzenden Koksmenge** sowie der Optimierung der Betriebsweise in den Kupolöfen ab. Ofenausbrüche werden stark verringert durch den Einsatz von futterlosen wassergekühlten Kupolofenvarianten. Der Kaltwind-Kupolofen ist die sogenannte Basisvariante ohne zusätzliche Verfahrensmodifikationen. Durch Anwendung zusätzlicher Verfahrensmodifikationen ergeben sich die folgenden **Kupolofenvarianten:** – **Kupolofen mit Sekundärwind** – **Kupolofen mit Sauerstoffeindüsung** – **Heißwind-Kupolofen** – **Futterloser wassergekühlter Heißwind-Kupolofen** – **Futterloser wassergekühlter Langzeit-Heißwind-Kupolofen** – **Koksloser Kupolofen** – **Gasgefeuerter koksgestützter Kupolofen** Beim Einsatz der genannten Kupolofenvarianten sind, bezogen auf die Basisvariante, Reststoffvermeidungspotentiale zwischen **20 bis 60 Prozent** möglich.	– Granulierung – Zerkleinerung	– Straßenbau* (z. B. Unterbaumaterial) – Bauindustrie* (z. B. Fertigbauteile) – Beimengung zu natürlichen Mineralstoffen*
Rinnenofenschlacke (80–100)		– Granulierung – Zerkleinerung	– Einsatz wie Kupolofenschlacke – Wiedereinsatz in der Hochofenindustrie zur Nutzung der Eisenanteile
Gichtgasstäube (zinkhaltig) (80–100)		– Aufkonzentration durch Windeindüsung in den Kupolofen – Aufbereitung und Abtrennung der Zinkanteile, z. B. im Wälzrohrverfahren	– Zinkverarbeitende Industrie
Ofenausbrüche (0)		– Zerkleinerung	– Bisher keine Verwertung
Koksgrus (100)		– Windeindüsung in Verbindung mit Ölen als Petrolkoks in den Kupolöfen zur Nutzung des Energieinhalts – Brikettierung	– Zusatzbrennstoff in Kupolöfen – Zusatzbrennstoff für Energie- oder Wärmeerzeugungsanlagen in Form von Staub, Briketts oder Pellets
Sonstige Stäube (aus Rinnen, Förderbändern, Ofenkopf) (10–50)		– Windeindüsung zur Aufkonzentration vor allem der Eisenanteile	– Verwertung wie bei Gichtgasstäben überprüfen*

* Untersuchungsbedarf

Tab. 0-1: Übersicht zur Vermeidung, Behandlungsmaßnahmen und Verwertungsmöglichkeiten für Abfälle/Reststoffe aus dem Kupolofenbetrieb

1 Einführung

Gußeisen ist ein vielseitig einsetzbarer Werkstoff für Bauteile im Maschinenbau, der Automobilindustrie oder im Apparatebau. Die verschiedenen Gußeisensorten werden in den Schmelzereien der Gießereibetriebe erschmolzen und in der Gießerei in Formen vergossen. Die größte Bedeutung in der Bundesrepublik beim Gußeisen hat das Gußeisen mit Lamellengraphit mit ca. 70–75 %. Dem folgt Gußeisen mit Kugelgraphit mit etwa 10–15 %. Der Rest verteilt sich auf den Temperguß und den Stahlguß.

In Baden-Württemberg sind keine großen Hochöfen oder Stahlwerke in Betrieb, sondern eine große Zahl von Gießereien, die ihre Einsatzstoffe zum Teil aus der Hochofenindustrie und vor allem aus dem Schrottrücklauf erhalten.

In diesem Bericht werden Kupolofen-Schmelzbetriebe betrachtet, die große Mengen Flüssigeisen für den Massenguß bereitstellen müssen.

Die Schmelzbetriebe werden im allgemeinen in eisenmetall- und nichteisenmetallverarbeitende Unternehmen eingeteilt. Die Eisenschmelzbetriebe erzeugen Stahl, Gußeisen und legierte Gußsorten.

In den alten Bundesländern produzierten 1989 knapp 900 Betriebe etwa 4,1 Mio. Tonnen der verschiedenen Metallsorten. Davon entfielen 3,5 Mio. t auf die Eisenmetallsorten, die in 420 Betrieben erschmolzen wurden. In Baden-Württemberg wurden in ca. 100 Betrieben etwa 516 000 t Eisen-, Stahl- und Temperguß hergestellt. Dieser Anteil von nur 15 % aus der Gesamtproduktion resultiert aus der Verarbeitung von relativ kleinen Gußteilen in großen Serien.

Insgesamt waren in allen Gießereibetrieben etwa 10 000 Personen beschäftigt. An Energie wurde etwa 116 kg Gießereikoks/t Guß und 873 kWh Strom/t Guß und etwa 85 Nm^3 Gas/t verbraucht.

In Baden-Württemberg fallen ca. 40 000 t Schlacken aus Schmelzanlagen der Eisengießereien an, darunter ca. 30 000 t Kupolofenschlacken. Diese Menge ist abgeleitet aus den spezifischen Schlackenmengen, da sie sich aus den statistischen Erhebungen nicht herleiten läßt.

Die wichtigsten Abfall-/Reststoffarten aus den Kupolofenbetrieben sind:

- Schlacken aus Kupolöfen (Schmelzaggregat)
- Schlacken aus Induktions-Rinnenöfen (Speichern)
- Schlacken aus Induktions-Tiegelöfen (Duplizieren)
- Gichtgasstäube
- Sonstige Stäube
- Ofenausbrüche
- Koksguß bzw. Koksstäube

Die Gichtgasstäube (AS 31215) sowie Ofenausbrüche mit schädlichen Verunreinigungen (AS 31108) sind besonders überwachungsbedürftige Abfälle nach der Abfallbestimmungsverordnung (AbfBestV). Die Produktionsanlagen sind alle nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz genehmigungsbedürftig. Sie unterliegen dem allgemeinen Vermeidungs- und Verwertungsgebot des Abfallgesetzes. Die Reststoffbestimmungsverordnung (RestBestV) sowie die Reststoffüberwachungsverordnung (RestÜberwV) verlangen das Führen von Entsorgungsnachweisen. Durch die Erhöhung der Deponiekosten sowie das im April 1991 in Kraft getretene Landesabfallabgabengesetz werden die Entsorgungskosten ansteigen.

Im Bereich der Reststoffe aus Kupolofen-Schmelzanlagen gibt es bisher nur wenige Vermeidungs- und Verwertungsaktivitäten. Forschungsberichte und Untersuchungen liegen nur in ge-

ringer Zahl vor. Dies liegt vor allem daran, daß Schlacken aus Kupolofen-Schmelzanlagen in der Vergangenheit kostengünstig deponiert werden konnten. Insbesondere stellen die Schlakken aus Kupolofenbetrieben nach den bisherigen Erkenntnissen keine Gefahr für Mensch und Umwelt dar. Die Schlacken sind weitgehend inert.

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, daß fast alle Schlacken aus diesen Kupolofen-Schmelzanlagen nach geeigneter Aufbereitung als Sekundärrohstoff im Straßenbau oder als Baustoff wieder verwertet werden können. Auch die Gichtgasstäube sowie die Koksstäube sind zum größten Teil wiederverwertbar. Für Ofenausbrüche werden derzeit noch keine Verwertungsmöglichkeiten gesehen.

Probleme bei der Verwertung bereiten die oft zu geringen Mengen der einzelnen Betriebe. Daher ist der gemeinsame Absatz von Schlacken verschiedener Betriebe anzustreben. Die Abbildung 1-1 stellt allgemein die Stoffflüsse in einer Kupolofen-Schmelzanlage unter Berücksichtigung von Vermeidungs- und Verwertungsmöglichkeiten dar.

Die vorliegende Arbeit ist in drei Teile gegliedert. In Teil A wird zunächst der Stand der Kupolofen-Schmelztechnologie dargestellt (vgl. Kapitel 2), sowie Aussagen zu den anfallenden Abfallarten (vgl. Kapitel 3) und zu deren Vermeidungs- und Verwertungsmöglichkeiten (vgl. Kapitel 4) getroffen. Teil B enthält in Kapitel 5 eine Beschreibung des untersuchten Betriebs sowie in Kapitel 6 eine Bilanzierung der eingesetzten Roh- und Hilfsstoffe und der entstehenden Abfälle/Reststoffe. In Teil C wird in Kapitel 7 auf die im untersuchten Betrieb bereits durchgeführten Maßnahmen zur Abfall-/Reststoffvermeidung und -verwertung eingegangen. Kapitel 8 enthält darüber hinausgehende Vorschläge zur Vermeidung und Verwertung der noch verbleibenden Abfall-/Reststoffarten. Außerdem sind hier Maßnahmen aufgeführt, die zu einer Verbesserung der Verwertbarkeit der Abfälle/Reststoffe beitragen.

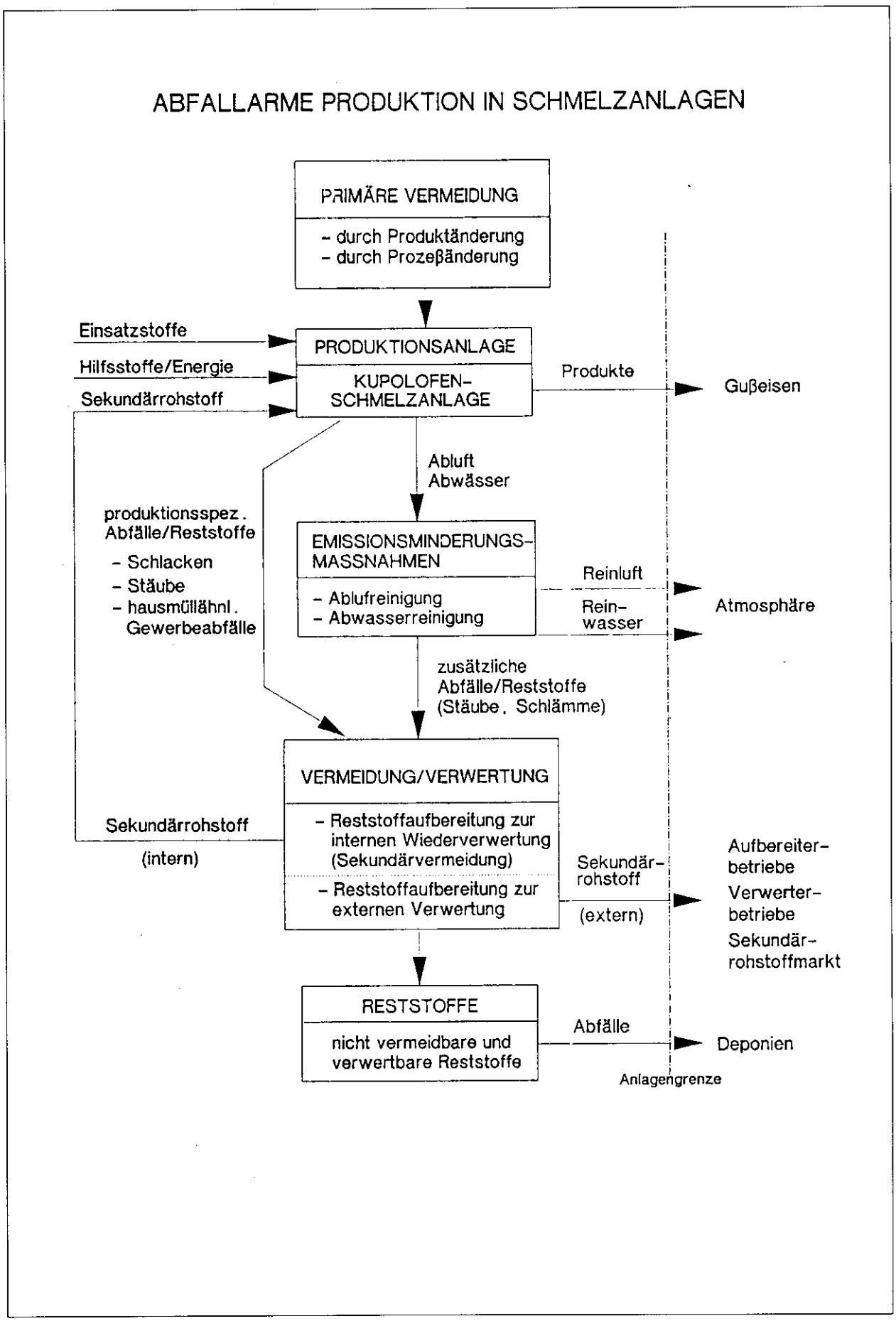


Abb. 1-1: Möglichkeiten der Vermeidung und Verwertung in Kupolofen-Schmelzanlagen

Teil A – Stand der Kupolofen-Schmelztechnologie

2 Grundlagen der Kupolofen-Schmelztechnologie

2.1 Übersicht zur Eisenmetallerschmelzung und Gußeisenwerkstoffe

Zum Verständnis von Kupolofen-Schmelzanlagen sind Kenntnisse über

- die wichtigsten Gußeisensorten,
- die zum Einsatz kommenden Schmelzaggregate,
- die Verfahrensprinzipien und Grundgesetze des Kupolofens,
- die Metallurgie im Kupolofenbetrieb und
- die wichtigsten Komponenten der Kupolofen-Schmelzanlage erforderlich.

2.1.1 Einteilung der Metalle in Gießereibetrieben

Die Metalle werden im allgemeinen nach ihrer Dichte klassifiziert und gegebenenfalls noch nach ihrem Schmelzpunkt eingeordnet. Dann wird die folgende Klassifizierung verwendet:

1. Leichtmetalle	(z.B. Aluminium, Magnesium, Titan)
2. Niedrigschmelzende Schwermetalle	(z.B. Blei, Cadmium, Zink, Zinn)
3. Hochschmelzende Schwermetalle	(z.B. Eisen, Kupfer, Chrom)
4. Sehr hoch schmelzende Schwermetalle	(z.B. Molybdän, Tantal, Wolfram)

In der Praxis hat sich die Unterscheidung der Metalle in Eisenmetalle und Nichteisenmetalle durchgesetzt. Die Eisenmetalle setzen sich aus Legierungen zusammen, die überwiegend Eisenanteile enthalten.

Die Unterscheidung der Eisenmetalle erfolgt im wesentlichen durch ihren Kohlenstoffgehalt:

Gruppe	**Kohlenstoffgehalt**
– Stähle – Stahlguß	kleiner 2 %
– Gußeisen – Temperguß – Hartguß etc.	größer 2 %

Die Metalle werden außerdem durch ihre mechanischen (z.B. Streckgrenze), physikalischen (z.B. Schmelzpunkt), technologischen (z.B. Umformbarkeit) und chemischen (z.B. Korrosionsbeständigkeit) Eigenschaften charakterisiert.

Die folgende Darstellung zeigt eine Übersicht der Schmelzprodukte in Gießereibetrieben. In Kupolöfen werden vor allem unlegierte und niedriglegierte Gußeisensorten erschmolzen.

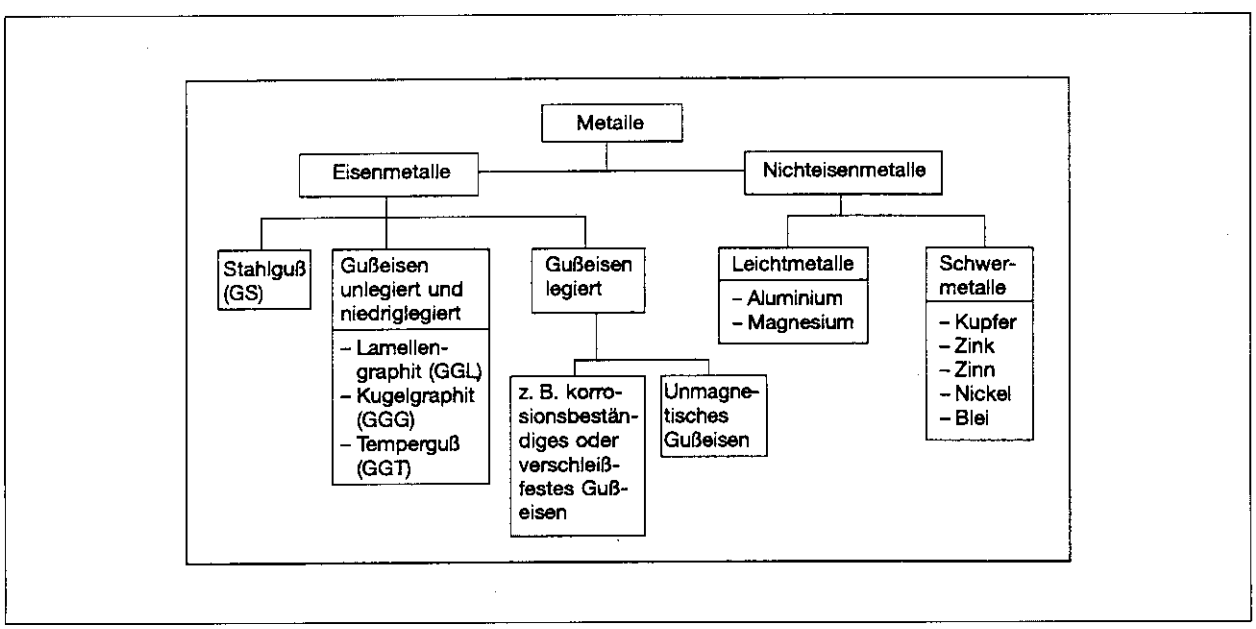


Abb. 2-1: Einteilung und Übersicht der wichtigsten Schmelzprodukte in Gießereibetrieben

Gießereibetriebe
Die Gießereien werden unterschieden nach der Art der eingesetzten Gießverfahren:

- Sandgießerei
- Maskengießerei
- Kokillengießerei
- Stranggießerei
- Druckgießerei
- Feingießerei
- Präzisionsgießerei
- Kunstgießerei

oder nach der zu vergießenden Gußart in

- Eisengießerei
- Tempergießerei
- Stahlgießerei
- NE-Metallgießerei

In dem nachfolgenden Kapitel werden die Gußeisenwerkstoffe kurz erläutert.

2.1.2 Gußeisenwerkstoffe

Der hohe Kohlenstoffgehalt im Gußeisen bewirkt einen niedrigen Schmelzpunkt und damit eine bessere Vergießbarkeit. Die Umformbarkeit des Gußeisens wird jedoch durch den hohen Kohlenstoffgehalt vermindert, so daß es sich nicht walzen oder schmieden läßt.

Die Eigenschaften einer Gußsorte hängen im wesentlichen von der Kombination des Grundgefüges und des Graphitanteils ab. Wichtigstes Unterscheidungsmerkmal der verschiedenen Gußeisensorten ist die Form der im Grundgefüge eingelagerten Graphitteilchen bzw. Kohlenstoffteilchen. Form und Größe der Graphitteilchen lassen sich durch die Schmelz- und Abkühlungsbedingungen sowie durch die chemische Zusammensetzung unterschiedlich ausbilden und üben starken Einfluß auf die Zugfestigkeit, Zerspanbarkeit und die plastische Umformbarkeit aus.

Anhand der Form der Graphitteilchen sind die folgenden Gußeisensorten aus Induktionsofen-Anlagen zu unterscheiden:

- Gußeisen mit Lamellengraphit (GGL)
- Gußeisen mit Kugelgraphit (GGG)
- Temperguß (GT)

Diese werden nach Bedarf in verschiedenen Spezifikationen erschmolzen. Daneben werden verschiedene Arten von Sonderguß, wie z. B. säurebeständiges und verschleißfestes Gußeisen, Hartguß sowie unmagnetisches Gußeisen hergestellt.

2.1.2.1 Gußeisen mit Lamellengraphit (GGL)

Gußeisen mit Lamellengraphit ist ein Eisen-Kohlenstoff-Gußwerkstoff mit meist 2,8–3,5% Kohlenstoff und, je nach Wanddicke und Sorte, unterschiedlichen Anteilen an Silizium (um 2%) und Mangan (um 0,5%). Dazu kommen noch geringe Anteile an Begleitelementen wie Phosphor und Schwefel und, falls erforderlich, Legierungselemente wie Chrom, Nickel, Molybdän und Kupfer.

Der Kohlenstoff liegt beim GGL überwiegend ungebunden in Form von Graphit-Lamellen im Grundgefüge vor. Die sehr gute Gießbarkeit mit vergleichsweise niedrigen Schmelz- und Gießtemperaturen, hohem Fließ- und Formfüllungsvermögen und geringer Lunkerneigung (Schrumpfung) sind eine Folge des hohen Kohlenstoffgehaltes.

Die vergleichsweise hohe Dämpfungsfähigkeit infolge des Energieverbrauchs beim Abbau von Spannungsspitzen an den Graphit-Lamellenspitzen macht diesen Werkstoff geeignet zum Einsatz im Maschinenbau (Betten bzw. Ständer für Dreh-, Bohr-, Fräsmaschinen usw.), Motorenbau, Fahrzeugbau und in vielen anderen Bereichen. Hinzu kommt noch die ausgezeichnete Dauerhaltbarkeit des Gußeisens mit Lamellengraphit bei kleinen Schlagimpulsen (Unwucht, Vibration, schnelle Arbeitshübe usw.) und nicht zuletzt die gute Zerspanbarkeit.

2.1.2.2 Gußeisen mit Kugelgraphit (GGG)

Gußeisen mit Kugelgraphit benötigt ein Basiseisen mit etwa 3,5–4,0 % C und 2,5–3 % Si, wobei ein Teil des SI als Impfmittel eingebracht wird. Phosphor und Schwefel sollten so niedrig wie möglich sein. Um ein perlitisches Grundgefüge zu erhalten, wird häufig Kupfer und gelegentlich auch Zinn zugegeben. Beim Gußeisen mit Kugelgraphit ist der Kohlenstoff fast vollständig als kugelförmiger Graphit im Grundgefüge eingelagert. Dies wird erreicht, indem die flüssige Schmelze aus Spezialgußeisen nach dem Abstich in besonders gestalteten Pfannen oder Behältnissen mit Magnesium behandelt wird. Das Magnesium, in Form von Vorlegierungen oder metallisch eingebracht, bewirkt eine Kristallisation des Kohlenstoffes zu kugeligen „Sphäroliten" in das Grundgefüge.

Das GGG füllt aufgrund seiner „stahlähnlichen" Eigenschaften die Lücke zwischen dem Stahl- und Grauguß. Aufgrund der hohen Zugfestigkeit des GGG von 400 bis 800 N/mm^2 (vgl. nur etwa 100 bis 400 N/mm^2 bei GGL) eignet sich dieser Werkstoff besonders für höher beanspruchte Bauteile. Das relativ hohe plastische Formänderungsvermögen von Gußeisen mit Kugelgraphit bietet eine große Sicherheit bei schlagartiger dynamischer Beanspruchung, weshalb es auch als „duktiles Gußeisen" bezeichnet wird.

2.1.2.3 Temperguß (GT)

Die Zusammensetzung des Temperrohgusses wird, besonders hinsichtlich des Kohlenstoff- und Siliziumgehaltes (Summe etwa 4 %), so eingestellt, daß er graphitfrei erstarrt und der gesamte Kohlenstoff daher im Gegensatz zum Gußeisen mit Lamellen- und Kugelgraphit in gebundener Form als Eisencarbid vorliegt. Das Bruchgefüge ist folglich „weiß" und nicht „grau" wegen des fehlenden schwarzen Graphits. Er ist aufgrund seiner hohen Härte und Sprödigkeit in diesem Zustand nicht verwendbar und muß einer Glühbehandlung, dem Tempern (lat.: temperare = mäßigen) unterworfen werden. Dabei zerfällt das Eisencarbid und der Kohlenstoff vergast bzw. scheidet sich als Graphit in Form kompakter Temperkohleknoten aus.

Je nach Glühbehandlung wird unterschieden zwischen „weißem" (GTW) und „schwarzem" (GTS) Temperguß.

Der entkohlend geglühte **weiße Temperguß** (Kohlenstoff von <0,15 %; Silizium von ca. 0,4–0,8 %; Mangan von ca. 0,5 %) ist gut schweißbar. Eine Eigenschaft, die ihm einen großen Anwendungsbereich im Fahrzeugbau erschlossen hat. Die Glühung erfolgt in einer speziell eingestellten oxidierenden Atmosphäre, z. B. in Tempererz, damit der Kohlenstoff ausdiffundiert.

Der **schwarze Temperguß** mit einem Kohlenstoffgehalt von ca. 2,3–2,6 %; Silizium von ca. 1,5 bis 1,2 %; Mangan von ca. 0,5 %) erfährt dagegen eine Zerfallsglühung in neutraler Ofenatmosphäre. Diese Gußsorte hat stahlähnliche Eigenschaften, ist weniger gut schweißbar, aber sehr gut spanend bearbeitbar. Aufgrund der relativ teuren Wärmebehandlung wird GTS zunehmend durch GGG ersetzt und verliert an Bedeutung.

2.2 Schmelz- und Warmhalteaggregate

2.2.1 Schmelzprinzipien

Das Schmelzen von Metallen erfordert neben den Einsatzmaterialien vor allem beträchtliche Mengen an Energie. Die zum Schmelzen benötigte Wärmemenge kann über verschiedene Verfahrenswege dem Eisen zugeführt werden. Die Erwärmungsmöglichkeiten lassen sich nach physikalischen Gesichtspunkten in drei Gruppen unterteilen:

A. Induktive Erwärmung

Dieses Prinzip findet beim induktiven Schmelzen mit dem Stromfluß durch das metallische Material (Sekundärseite) technische Anwendung. Die Spule (Primärseite), ein von Kühlwasser durchflossenes Kupferrohr, erzeugt ein elektromagnetisches Feld, das die elektrische Energie auf den metallischen Tiegelinhalt überträgt.

B. Mittelbare Erwärmung durch Konvektion

Das vorerhitzte Wärmeübertragungsmedium (z. B. Heißwind) erwärmt mittelbar das eingesetzte Material durch Konvektion auf Temperaturen von 800 bis 900 °C. Die Wärmeübertragung im Kupolofen läuft in der oberen Schachthälfte nahezu ausschließlich über Konvektion ab, während im Düsenbereich die Strahlung maßgeblichen Anteil hat.

C. Mittelbare Erwärmung durch Strahlung

Die Energiequelle erwärmt das Trägermedium, das seine Wärme wiederum durch Strahlung an das eingesetzte oder zu schmelzende Material abgibt. Die Wärmeübertragung durch Strahlung wird erst voll wirksam bei Temperaturen über 750 °C. Als technische Anwendungsbeispiele seien der Lichtbogenofen, der Kupolofen im unteren Schachtbereich, der Herdflammenofen sowie der Drehtrommelofen und auch der widerstandsbeheizte Graphitstabofen angeführt.

2.2.2 Einsetzbare Ofenarten in Schmelzbetrieben für Eisenguß

Neben Kupolöfen werden nachfolgend auch die übrigen Ofenbauarten mit ihren typischen Anwendungsgebieten kurz beschrieben:

- Trocken- und Vorwärmöfen
  - Kammerofen
  - Durchlaufofen
- Schmelzöfen
  - Kupolofen
  - Induktions-Tiegelofen
  - Induktions-Rinnenofen
- Warmhalte- und Vergießöfen

Trocken- und Vorwärmöfen

Trocken- und Vorwärmöfen werden vor allem in Elektro-Schmelzbetrieben vor dem Chargieren eingesetzt. Feuchte Einsatzmaterialien werden getrocknet und vorgewärmt und in Schüttelrosten von anhaftenden Verunreinigungen befreit. Dadurch erhöht sich die Schmelzleistung. Im allgemeinen wird so Energierückgewinnung durch Abwärmenutzung praktiziert. Bei den eingesetzten Ofenarten handelt es sich vorwiegend um Kammer- oder Durchlauföfen.

Kupolofen

Kupolöfen sind Schachtöfen und werden vorwiegend in Gießereischmelzanlagen für die Herstellung von Gußeisen eingesetzt. In Verbindung mit anderen Öfen dienen sie auch als Vorschmelzaggregat, insbesondere für das Basiseisen von Temperguß und Gußeisen mit Kugelgraphit. Sie bieten eine kostengünstige und schnelle Verfahrenstechnik zum Erschmelzen von unlegiertem oder niedriglegiertem Eisen. Die Grundbauformen sind der Kalt- und der Heißwind-Kupolofen.

Induktions-Tiegelofen

Induktionstiegelöfen werden zum Erschmelzen oder Warmhalten eingesetzt. Sie bestehen im wesentlichen aus einem feuerfesten Tiegel mit Deckel, der ihn umgebenden Induktionsspule und einem tragenden Stahlgerüst.

Mit Netzfrequenz betriebene Induktions-Tiegelöfen werden im Normalfall mit einem „Sumpf" (Restmenge von flüssigem Metall) – etwa ein Viertel des Tiegelinhalts – betrieben. Zum „Anfahren" ohne Sumpf werden metallische Einsatzstücke von einer der Tiegelform angepaßten Mindestgröße vorher in den Tiegel eingesetzt.

Mittelfrequenztiegelöfen werden mit einer Frequenz von 500 bis 1 000 Hz betrieben. Sie haben hohe spezifische Schmelz- und Überhitzungsleistungen und können ohne Sumpf angefahren werden.

Induktions-Rinnenofen

Induktions-Rinnenöfen werden für Eisen überwiegend als Warmhalte- oder Überhitzungsaggregat eingesetzt. Sie haben sich als Warmhalte- und Vergießaggregat besonders bewährt.

Warmhalte- und Vergießöfen

Alle oben aufgeführten Öfen, mit Ausnahme der Kupolöfen, können auch zum Warmhalten und Speichern von flüssigem Metall eingesetzt werden. Warmhalteöfen dienen als Puffer zwischen Schmelzbetrieb und Gußteilfertigung, sie sind darüber hinaus erforderlich, wenn Flüssigmetall fremd bezogen wird.

Anwendungsbereiche

Kupolöfen und Induktions-Tiegelöfen haben in den Schmelzanlagen die größte Bedeutung. Für den sogenannten Massenguß dominiert eindeutig der Kupolofen, wenn auch heute bereits die technischen Voraussetzungen gegeben sind, den Induktions-Tiegelofen bis zu Leistungen von 50t/h für Massenguß einzusetzen.
Wesentlich stärker als im Bereich des Massengusses hat sich der Induktions-Tiegelofen beim Schmelzen von Sphäroguß durchgesetzt. Der Hauptgrund hierfür liegt in den höheren qualitativen Anforderungen dieser Gußart. Außerdem kommt bevorzugt der Induktionsofen zum Einsatz, wenn höhere Forderungen an die Temperatur gestellt werden. Vielfach spielt zusätzlich die Flexibilität eine Rolle, die bei der relativ starren Führung des Kupolofens nicht immer in ausreichendem Maße gegeben ist. Bei nur zeitweiligem, z.B. einschichtigem, Schmelzbetrieb stellt der **Mittelfrequenzofen** anstelle des Netzfrequenzofens die flexiblere Lösung dar. An Bedeutung gewinnt der noch in Entwicklung befindliche **kokslose Kupolofen** wegen seiner geringen Umweltbelastung.

2.2.3 Kupolofen-Schmelzbetrieb und Nebenschmelzaggregate

Die **Abbildung 2-2** vermittelt eine Gesamtübersicht über das Schmelzen von Eisenguß-Werkstoffen. Sie zeigt den Weg des flüssigen Eisens vom Schmelzaggregat bis zum Abguß alternativ entweder durch

- „Kupolofen mit nachgeschalteter Entschweflung und Aufkohlung" oder
- „Induktions-Tiegelofen im Simplex- oder Duplexbetrieb",
- „gefolgt von den „Speicher-(Puffer-)Öfen", die als Warmhalteöfen in Form von Induktions-Rinnen- oder -Tiegelöfen ausgeführt sind.

Bei den „Vergießöfen" für den Serienguß bietet der „Induktions-Rinnenofen" mit seinem Speichervermögen eine ständige Gießbereitschaft bei gleichbleibenden Gießbedingungen.

Bei der GGG-Herstellung ist die Magnesium-(Mg-)Behandlung vorgelagert. Die fünf wichtigsten Verfahren vom Übergießen bis zum Konverterverfahren sind angeführt. Das behandelte Eisen wird in den mit Stickstoff-Atmosphäre betriebenen geschlossenen Druckgießöfen über längere Zeit warmgehalten und gießbereit gespeichert.

In vielen Gießereien wird das Flüssigeisen im Induktionsofen dupliziert, da das Eisen auf diesem Wege flexibel und treffsicher auf jede gewünschte Qualität eingestellt werden kann. Duplizieren bezeichnet den zweistufigen Schmelzbetrieb mit getrennten Öfen (z. B. Kupolofen → Induktionsofen). Duplizieren bedeutet auch das Überhitzen des vorgeschmolzenen Eisens, Speichern und ggf. Korrektur hinsichtlich seiner Zusammensetzung. Das Duplexverfahren wird vorwiegend für die Herstellung von GGG und GT angewandt.

2.2.4 Energieeinsatz

Aufgrund des hohen spezifischen Energieverbrauchs einer Gießerei von 2500 bis 3000kWh pro Tonne gutem Guß resultiert das Bemühen, über Rationalisierungsmaßnahmen den Verbrauch zu senken.

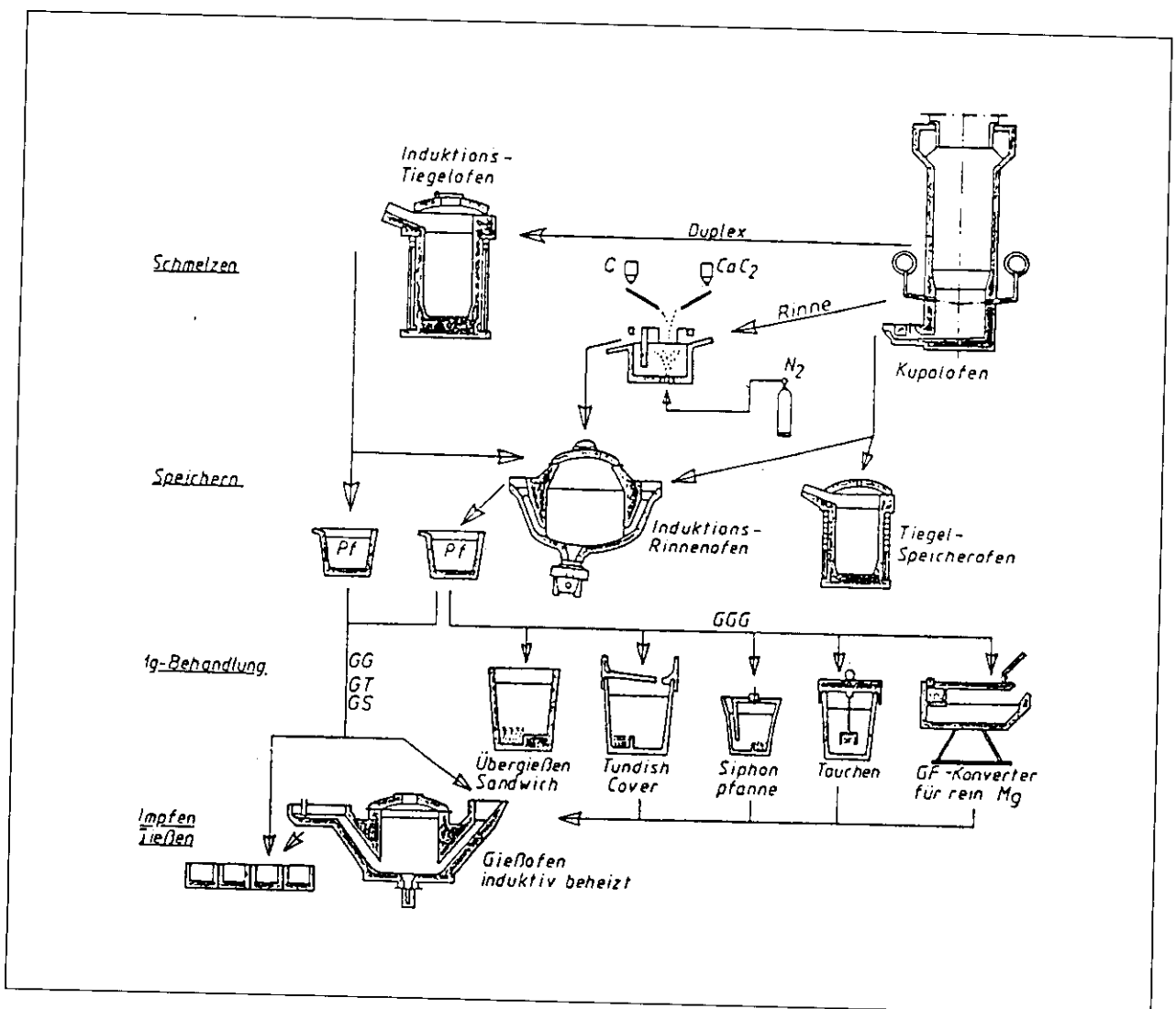


Abb. 2-2: Schmelzen von Eisenguß (Q.: VDG-Weiterbildung)

Der Energieverbrauch in einem beispielhaften Gießereibetrieb setzt sich wie folgt zusammen:

- Schmelzbetrieb ca. 46,0%
- Temperbetrieb ca. 19,5%
- Betrieb ca. 19,0%
- Heizung ca. 12,5%
- Gießerei ca. 3,0%

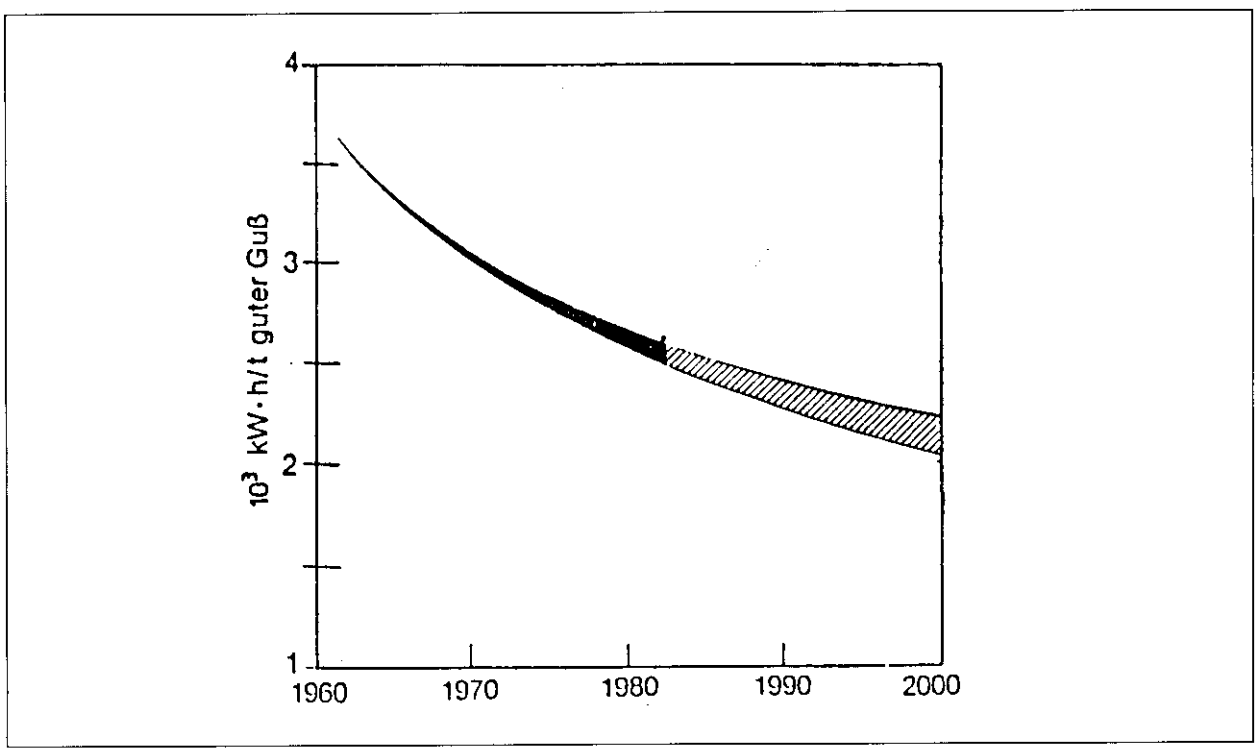


Abb. 2-3: Spezifischer Energieverbrauch der Eisen-, Stahl- und Tempergießereien der Bundesrepublik (Q.: VDG-Weiterbildung)

Der Hauptanteil des Energieverbrauchs in einer Gießerei entfällt auf den Schmelzbetrieb.

Bei den weiteren Entwicklungsbemühungen in den Schmelzereien sollten folgende Alternativen geprüft werden:

- Einführung von Verfahren mit möglichst geringem Kokszusatz,

- Optimierung der Verbrennungsprozesse im Kupolofen,

- Kokssubstitution durch Öl- oder Erdgaszusatz über eine zweite obere Düsenreihe. Durch Verlagerung der Schmelzzone und damit einer intensiven Vorwärmung ist auch eine CO_2-Verringerung möglich (NEUMANN).

- Brennstoffmengenminderung und Schmelzleistungserhöhung durch Optimierung des Sauerstoffeinsatzes.

Grundsätzlich ist bei jeder Senkung des Energieeinsatzes die Verringerung sämtlicher Reststoffe zu erwarten. Deshalb eignet sich die Umstellung auf verbrauchsärmere Schmelzöfen besonders zur Vermeidung von Abfällen in Kupolofenanlagen. Auf diese Zusammenhänge wird in Kapitel 4 eingegangen.

2.3 Verfahrensprinzip und Grundgesetze des Kupolofens

Die nachfolgende **Abbildung 2-4** gibt schematisch eine Heißwind-Kupolofenanlage mit den wichtigsten Nebenanlagen wieder.

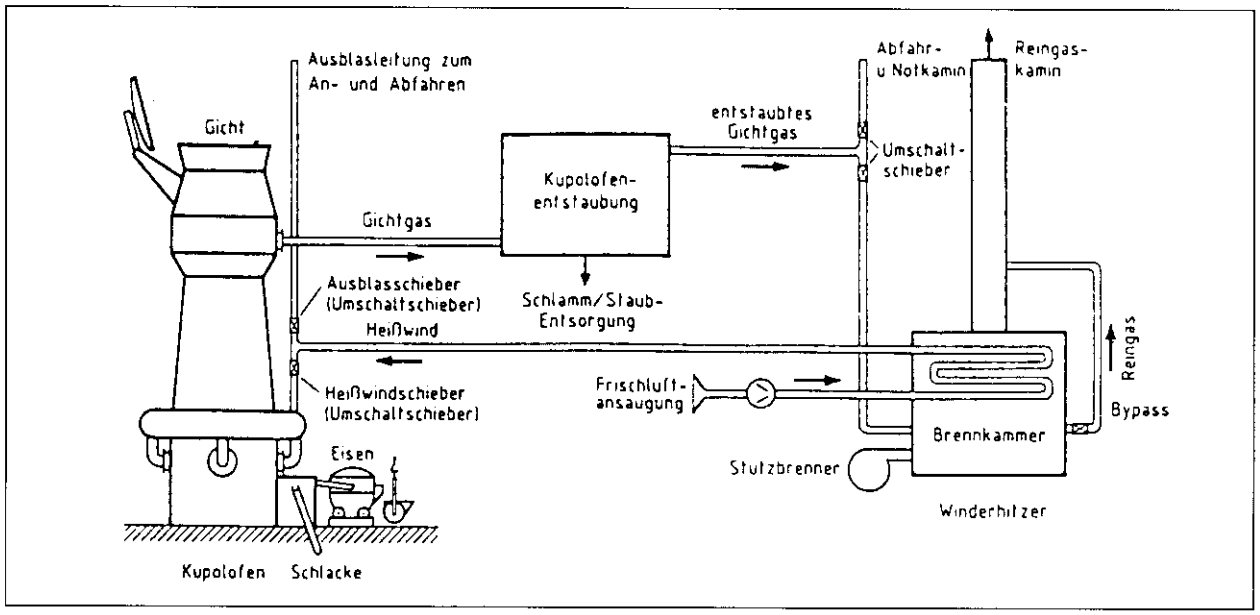


Abb. 2-4: Heißwind-Kupolofenanlage mit Entstaubung und eigenbeheiztem Winderhitzer (Q: VDG-Merkblatt G602)

Um die Möglichkeiten zur Vermeidung, Verminderung und Verwertung der Reststoffe in einem Kupolofenbetrieb beurteilen zu können, ist die Kenntnis der prinzipiellen Verfahren sowie der chemischen und physikalischen Grundgesetze erforderlich.

Entscheidenden Einfluß auf die Verfahrenstechnik der derzeit betriebenen Kupolöfen haben

- Koks,
- Kohlendioxid-Kohlenmonoxid-Reaktionen mit Sauerstoff,
- Gichtgas,
- Art der Wärmeübertragung,
- Beziehung zwischen Kokssatz, Windmenge und Schmelzleistung.

2.3.1 Koks und dessen wichtige Begleitstoffe

Der als Energieträger verwendete Koks dient auch gleichzeitig als tragende Säule für die Beschickung. Der untere Teil des Schachts ist mit im Betrieb weißglühendem Koks gefüllt, der beim Kontakt mit den flüssigen Eisentropfen Kohlenstoff und Schwefel an das Eisen abgibt und bei Berührung mit Schlackeoxiden auf diese reduzierend wirkt.

Der Koks hat als Ballaststoff einen Aschengehalt von 9 bis 10%, der aufgrund seines hohen Anteils an Siliziumoxid (40–50% SiO_2) auch als saure Gangart bezeichnet wird. Die restlichen Bestandteile der Asche sind 27 bis 40% Aluminiumoxid (Al_2O_3), 8 bis 14% Eisenoxid (Fe_2O_3), 4% Calciumoxid (CaO) und 2,5% Magnesiumoxid (MgO).

Die saure Gangart, die allerdings nicht nur durch die Koksasche, sondern überwiegend durch den Futterausbrand und den dadurch bedingten Siliziumverlust entsteht, wird durch entsprechende Kalksteinzugabe (etwa 30% des Kokssatzes) kompensiert. Der Schwefelgehalt des Kokses liegt meist um 0,9% und der Kohlenstoffgehalt bewegt sich im Bereich um 85%. Die Verbrennungs- und Vergasungsvorgänge des Kokses laufen in ausgeprägten Ofenzonen ab (**Abbildung 2-5**).

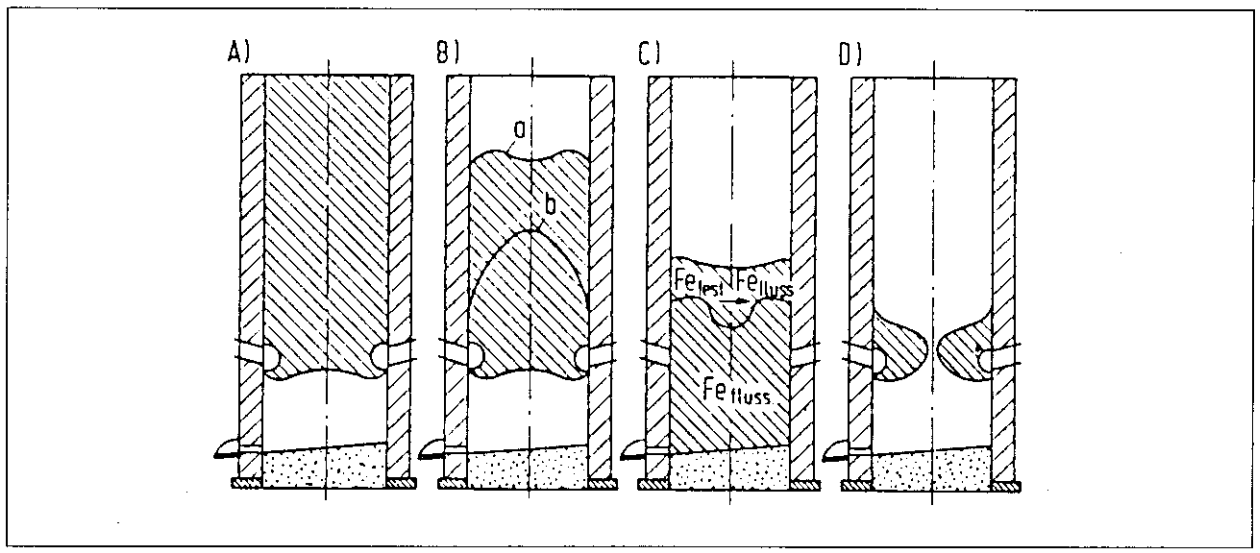


Abb. 2-5: Zoneneinteilung des Kupolofens
A) Zone des Wärmeübergangs von den Verbrennungen auf die Einsatzstoffe,
B) Reduktionszone (CO_2+ C → 2 CO), C) Schmelzzone und Zone des flüssigen Eisens,
D) Verbrennungszone ($C+O_2 \rightarrow CO_2$)
a theoretische Isotherme, b experimentelle Isotherme
(Q.: Neumann)

2.3.2 Hauptreaktionen zwischen Kohlenstoff und Sauerstoff

Da der Koks in Düsennähe unter Luftüberschuß verbrennt, entsteht zunächst überwiegend Kohlendioxid (CO_2). Außerdem entsteht durch die Teilverbrennung auch Kohlenmonoxid (CO). In den folgenden Gleichungen sind die ablaufenden exothermen Reaktionen dargestellt:

$C + O_2$	$\rightarrow CO_2$	mit der spezifischen Verbrennungswärme = – 33240 kJ/kg
$C + {}^1/_2\, O_2$	$\rightarrow CO$	mit der spezifischen Verbrennungswärme = – 9625 kJ/kg

Aufgrund der Boudouardbeziehung wird im Anschluß an die CO_2-Bildung ein Teil der freigesetzten Reaktionsenergie, wenn auch zeitlich und örtlich verzögert, wiederum für die CO_2-Reduktion zu CO verbraucht:

$CO_2 + C$	$\rightarrow 2\ CO$	mit der spezifischen Verbrennungswärme = + 14009 kJ/kg

Als Folge dieser Reaktion tritt ein zusätzlicher Koksverbrauch ein und ungenutztes CO verläßt mit dem Gichtgas den Ofen, so daß der thermische Wirkungsgrad auf zweifache Weise durch die CO_2-Reduktion verschlechtert wird.

2.3.3 Gichtgas

Aus energiewirtschaftlicher Sicht werden die im Gichtgas enthaltenen brennbaren Anteile im Winderhitzer zur Erwärmung des Heißwinds genutzt. Diese brennbaren Bestandteile sind

- Kohlenmonoxid,
- Wasserstoff,
- organische Bestandteile,
- feiner Koksstaub.

Aus dem oberen Schachtbereich wird über die Gichtgasleitung das im Kupolofen entstandene Gichtgas zur Brennkammer gefördert. Das Gichtgas setzt sich aus dem Ofengas und der Falschluft zusammen. Das Ofengas entsteht bei der Verbrennung von Koks mit Heißwind und enthält Bestandteile, die sich im Ofenschacht bilden. Die Falschluft wird aus dem Ofenhaus angesaugt und vermischt sich mit dem Ofengas in der Ringkammer.

Der Anteil des CO im Ofengas schwankt zwischen 10 Vol.-% und 18Vol.-% im normalen Ofenbetrieb. Der Anteil des CO im Ofengas erhöht sich mit steigendem Kokssatz, wobei die Schmelzleistung sinkt und bei optimaler Windzufuhr die Eisentemperatur ansteigt. Die Verweilzeit wird länger und der Ofeninhalt heißer. Damit verbleiben Koks und Gas länger im Temperaturbereich der Boudouardreaktion.

Der Wasserdampf im Wind wird nach den Winddüsen in Gegenwart von Kokskohlenstoff nach der Wassergas-Reaktion zu CO und H_2 zerlegt. Die Wassergas-Reaktion verbraucht Kokskohlenstoff und Wärme. Die Wärmeverluste durch die Zerlegung des Wassers können 2–3% der insgesamt eingebrachten Wärme betragen.

Der Wasserstoff und das Kohlenmonoxid sind Zusatzbrennstoffe, die das Ofengas anreichern. Weitere Zusatzbrennstoffe werden durch die Verdampfung von organischen Verunreinigungen des Schrottes gebildet. Öle und Fette werden im oberen Ofenschacht verdampft. Die entstehenden Kohlenwasserstoffe erhöhen den Heizwert des Ofengases. Außerdem wird feiner Koksstaub mit dem Gichtgas aus dem Ofen gezogen. Auch dieser Staub erhöht den Heizwert des Ofengases und verbrennt anschließend in der Brennkammer.

Das Ofengas wird durch die Mischung mit Falschluft in der Ringkammer verdünnt. Die Zufuhr von Falschluft zum Ofengas ist erforderlich, damit kein Ofengas aus der Begichtungsöffnung austritt. Die Falschluftmenge schwankt in der Praxis zwischen 5 und 20% der Menge des Ofengases.

Die Einstellung des optimalen Wertes für den CO-Gehalt im Gichtgas bestimmt mit die Höhe der Betriebskosten der Schmelzanlage. Die Verbrennung des CO reduziert den Koksbedarf und verringert vor allem die Staubmengen.

2.3.4 Wärmeübertragung und Energiebilanz des Kupolofens

Die Übertragung der fühlbaren Wärme der erhitzten Ofengase auf die niedergehende Beschikkung ist im wesentlichen eine Funktion

- des Temperaturgefälles zwischen dem Gas und der Beschickung,
- der Weglänge, die durch die effektive Schachthöhe vorgegeben ist,
- der Strömungsverteilung und Gasgeschwindigkeit
- sowie der Beschaffenheit der Einsatzstoffe, insbesondere der Stückigkeit.

Die zum Aufschmelzen von Metallen bzw. deren Legierungen erforderliche Energie entspricht der Schmelzenthalpie der betreffenden Stoffe. Da beim Kupolofen Energieerzeugung und

-übertragung in ein und demselben Aggregat ablaufen, muß auch die Energiebilanz für beide Vorgänge zusammengefaßt betrachtet werden. Auf der Energieerzeugungsseite steht als wesentliche Quelle die Koksverbrennung, während auf der Nutzenseite der Wärmeinhalt des flüssigen Eisens die eigentliche Zielgröße darstellt. Die Gichtgaswärme, Ofenabstrahlung und Schlackenwärme gehören ebenfalls zu den Verlusten.

Die nachfolgende **Tabelle 2-1** gibt die Energieflüsse für das Schmelzen von Gußeisen in einem futterlosen Heißwind-Kupolofen mit nachgeschaltetem Induktions-Rinnenofen in Prozent wieder.

	%
EINSATZENERGIEN	
Primärenergie	98,0
Zuschläge	0,2
Metalloxidation	1,8
	100,0
NUTZENERGIEN	
Nutzenergie (Produkt-Flüssigeisen)	17,9
Nebenprodukte	6,9
Überschußgas	10,2
Antriebe	0,2
VERLUSTENERGIEN	
Schlackenverluste	4,1
Ofenverluste	13,8
Abgasverluste	20,2
Warmhalteverluste	3,0
Energiebereitstellungsverluste	10,8
Energieverteilungsverluste	6,4
Abbrandverluste	6,5
	100,0

Tab. 2-1: Energieflüsse in einer futterlosen Heißwind-Kupolofenanlage mit nachgeschaltetem Induktions-Rinnofen (Beispiel mit 30 t Nutzfassung und Kokssatz von 13%) (Q: Decker)

Aus energiewirtschaftlichen Gründen ist eine Gichtgasbeheizung zur Windvorwärmung in Rekuperatoren (Wärmetauschern) sehr nützlich. Bei sonst gleichen Bedingungen ist für die Wirtschaftlichkeit entscheidend, ob der Rekuperator gichtgas- oder fremdgasbeheizt wird.

2.3.5 Beziehung zwischen Kokszusatz, Windmenge und Schmelzleistung

Als Kokssatz wird der Kokseintrag in kg Koks pro 100kg Flüssigeisen verstanden.

$$\text{Kokssatz } K = \frac{\text{Koksmenge in kg}}{\text{100 kg Flüssigeisen}}$$

Bei konstantem Kokssatz und unverändertem Verbrennungsverhältnis

$$\text{Verbrennungsverhältnis} = \frac{\text{Kohlendioxid} \times 100}{\text{Kohlendioxid + Kohlenmonoxid}} = \frac{CO_2 \times 100}{CO_2 + CO}$$

besteht eine lineare Beziehung zwischen der Schmelzleistung und der eingeblasenen Windmenge.

Schmelzleistung × Windverbrauch = Windmenge

Mit steigender Windmenge ist ein linearer Anstieg der Schmelzleistung zu erwarten. Dies bestätigt sich in der Praxis. Der Zusammenhang zwischen der Windmenge und der Eisentemperatur ist in **Abbildung 2-6** für unterschiedliche Kokssätze dargestellt.

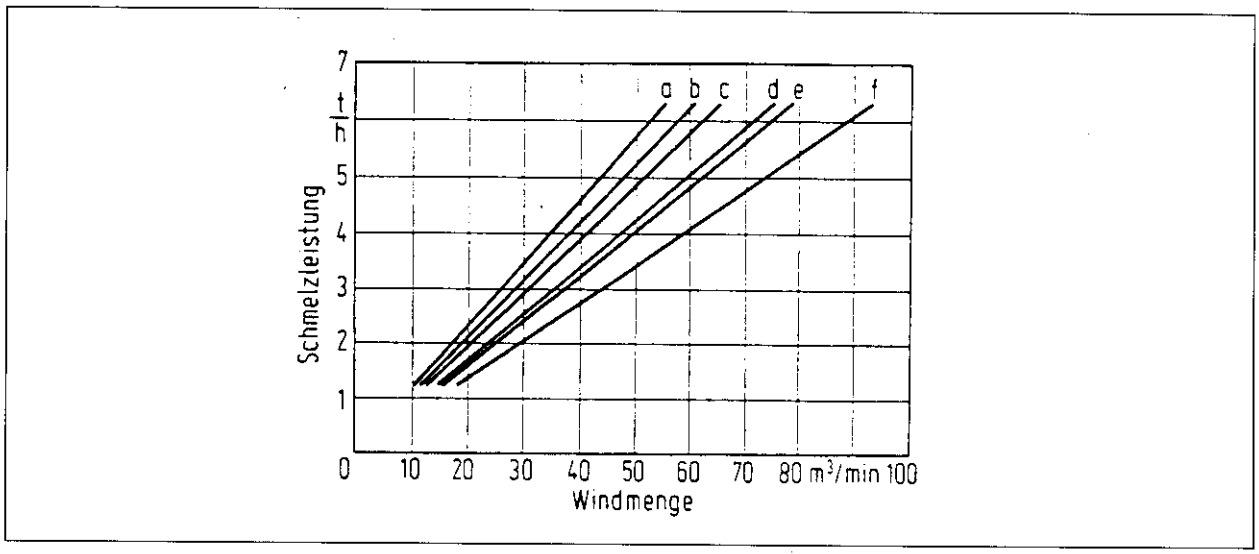


Abb. 2-6: Beziehungen zwischen Windmenge, Kokssatz und Schmelzleistung
a: Kokssatz 8%, b: Kokssatz 9%, c: Kokssatz 10%,
d: Kokssatz 12%, e: Kokssatz 13%, f: Kokssatz 16%
(Q.: Neumann)

Daraus ist zu erkennen, daß bei steigendem Kokssatz eine jeweils größere Windmenge zur Verfügung gestellt werden muß, um eine bestimmte Schmelzleistung zu erhalten. Das Betreiben der Anlage im günstigen Bereich setzt eine enge Zuordnung von Windmenge, Kokssatz und Temperatur voraus, um ein Optimum hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit, Gleichmäßigkeit des Schmelzergebnisses und der metallurgischen Erfordernisse zu gewährleisten.

Hierin liegt eine wesentliche Einschränkung in bezug auf die Flexibilität des Schmelzbetriebs gegenüber dem Gießbetrieb, da wechselnde Eisenabnahmen oder sogar Unterbrechungen unvermeidbar sind, so daß der Ofen in der Praxis vielfach außerhalb des Optimums, d.h. im Unter- oder Überblasbereich, betrieben wird.

2.4 Metallurgie im Kupolofen

Der Begriff Metallurgie umschreibt alle Maßnahmen, die während der metallurgischen Umwandlungen bzw. Schmelzführung im Kupolofen stattfinden. Die metallurgische Schmelzführung umfaßt neben den Vorgängen beim Schmelzen, Nachbehandeln und beim Vergießen auch den Rohmaterialeinsatz selbst.

Der metallurgische Prozeß wird außerdem beeinflußt durch das Oxidationsverhalten der eingesetzten Stoffe und die Wirkung der Überhitzung auf das Flüssigeisen. Die Qualität des Flüssigeisens wird zusätzlich bestimmt durch die Anteile von Kohlenstoff, Schwefel, Silizium und Phosphor.

Zur Beurteilung von Vermeidungs- und Verwertungsmöglichkeiten ist die Kenntnis der metallurgischen Vorgänge im Kupolofenbetrieb notwendig.

2.4.1 Einsatzstoffe und Gußeigenschaften

Das metallurgische Gleichgewicht des Prozesses wird entscheidend von den komplementären Anteilen Roheisen und Stahlschrott geprägt.

Roheisen
Roheisen bringt eine günstige strukturelle Ausgangsbasis für das spätere Keimgeschehen mit sich, da es sich als heterogener Stoff mit dem eingelagerten, schwer aufschmelzbaren Graphit verbindet. Weiterhin enthält Roheisen Anteile an SiO_2, Sulfiden u. a., die bei der meist relativ schwachen Überhitzung (abhängig von Temperatur und Dauer) im Kupolofen zu einem gewissen Anteil in der Schmelze verbleiben und nicht von der Schlacke aufgenommen werden.

Stahlschrott
Wesentlich anders verläuft das metallurgische Geschehen, wenn anstelle von Roheisen hohe Stahlschrottsätze aufgegeben werden. Stahlschrott schmilzt schwerer und ist in der Stückigkeit ungleichmäßiger. Was das Keimgeschehen betrifft, so ist Stahlschrott im Vergleich zu Roheisen als relativ homogener Werkstoff anzusehen. Bei hohen Stahlschrottsätzen, insbesondere bei weniger ausgewählten Sorten, d.h. bei minderen oder Mischqualitäten, wächst die Gefahr der Gasporosität. Höhere Stahlschrottanteile machen es auch erforderlich, daß zum Aufsilizieren besondere Zuschläge gemacht werden müssen. Neben FeSi-Briketts werden in zunehmendem Maße SiC-Briketts eingesetzt. Letztere wirken sich auch metallurgisch günstig auf das Oxidationsverhalten, auf eine verminderte Lunkerneigung und auch auf das Keimgeschehen aus. Der zur Aufkohlung des Stahlschrottes erforderliche Kohlenstoff wird außerdem dem Kokssatz entnommen (bis zu 3,3% C). In Gattierungsrechnungen wird üblicherweise angenommen, daß sich Stahl bis auf etwa 2,7% C aufkohlt.

Zunehmend wird verzinkter Stahlblechschrott wieder eingeschmolzen. Das Zink verdampft bereits vor Erreichen der Gußeisenschmelztemperatur. Dadurch erhöht sich der Zinkgehalt in den Abluftstäuben.

2.4.2 Oxidationsverhalten und Überhitzung

Oxidation bedeutet Verbrennung von Eisenbestandteilen und Zusätzen durch die Einwirkung von Sauerstoff. Je heißer der Ofen gefahren wird, um so schwächer ist die Oxidationsneigung. Damit ist das Maximum der Temperatur mit einem Minimum an Abbrand verbunden, was auch eine besser ausreduzierte Schlacke und damit einen niedrigeren FeO- und MnO-Gehalt zur Folge hat.

Ein weiteres Kriterium für die Oxidationsneigung ist die Gaszusammensetzung. Je höher der CO_2-Anteil ist, um so größer ist die Oxidationsneigung. Bei hohem Kokssatz oder aber bei heißer Ofenführung stellt sich ein niedrigeres Verbrennungsverhältnis ($CO_2 \times 100 / CO_2 + CO$) ein, was dem Abbrandverhalten und auch einer geringeren Schlackenmenge zugute kommt. Wie die **Abbildung 2-7** zeigt, fällt der Abbrand mit steigendem Kokssatz, was sich in Verbindung mit der Windvorwärmung auch in einem verminderten FeO-Gehalt der Schlacke ausdrückt. Hierbei sind Heißwind und Kokssatz als Indikatoren für heißes Eisen und Oxidation zu verstehen.

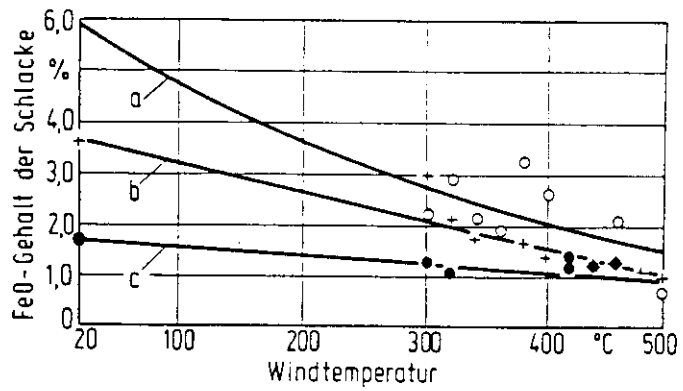


Abb. 2-7: Eisenoxidgehalt der Schlacke in Abhängigkeit von der Windtemperatur bei verschiedenen Kokssätzen
a (o): 9% Koks, b (+): 11% Koks, c (•): 13% Koks

Die Überhitzung der Schmelze auf die Bereitstellungstemperatur ist erforderlich, weil bis zum Vergießen im allgemeinen eine Verzugszeit berücksichtigt werden muß, durch die sich die Schmelze abkühlt.

2.4.3 Kohlenstoff

Die Einstellung des Kohlenstoffgehaltes im Gußeisen wird durch die Aufkohlung mittels geeigneter Kohlenstoffträger beim Schmelzen erreicht. Je basischer die Schlacke ist, um so intensiver ist die Aufkohlung. Die bessere Aufkohlung in Gegenwart basischer Schlacken ist besonders auf die chemischen Wechselwirkungen zwischen der Koksasche und der Schlacke zurückzuführen. Die Koksasche ist ihrer chemischen Zusammensetzung nach sauer und wird somit von basischen Schlacken schneller abgelöst. Durch das ständige Auflösen der Koksasche werden die Kohlepartikel zur weiteren Reaktion wieder freigelegt, was die Aufkohlung begünstigt.

Je nach Schlackenbasizität, die im futterlos betriebenen Ofen in weiten Grenzen von 0,5 bis 3,5 variiert werden kann, läßt sich ein Kohlenstoffgehalt von 2,8 bis 4,2% in Flüssigeisen einstellen. Die folgende Formel beschreibt die Schlackenbasizität:

$$\text{Schlackenbasizität} = \frac{\text{Calciumoxid} + \text{Magnesiumoxid}}{\text{Siliziumoxid}}$$

Allerdings sind noch weitere Einflußgrößen von Bedeutung, so der Kohlenstoffgehalt des Einsatzguts, die Temperatur, das Sauerstoffpotential, die Benetzbarkeit der verschiedenen miteinander reagierenden Phasen, deren Berührungsintensität sowie die Weglänge der Berührung mit dem glühenden Koks.

2.4.4 Schwefel

Schwefel wird vorwiegend, ähnlich wie der Kohlenstoff, von den herabfallenden Eisentropfen aus dem glühenden Koks aufgenommen, wenn von dem geringen Anteil, der über die Gasphase ins Eisen gelangt, abgesehen wird.

Die Schwefelaufnahme ist um so intensiver, je höher der Kokssatz und je höher der im Koks enthaltene Schwefel ist. Weiterhin ist es von Einfluß, ob der Ofen heiß und reduzierend gefah-

ren wird. Die sich einstellenden Schwefelgehalte im Flüssigeisen liegen meist zwischen 0,12 und 0,15%. Da im allgemeinen mit saurer Schlacke gearbeitet wird, ist deren Lösungsfähigkeit für Schwefel gering. Lediglich mit dem in Sonderfällen eingesetzten futterlos-basischen Kupolofen ist eine Entschwefelung im Kupolofen selbst möglich.

Der Schwefel wirkt sich in vielen Fällen negativ auf die Eigenschaften des Gußeisens aus, so daß man den aus dem Koks aufgenommenen Schwefel wieder entfernen muß. Dies gilt insbesondere für Sphäroguß, der nicht zuletzt aus diesem Grunde vorwiegend im Induktions-Tiegelofen erschmolzen oder dupliziert wird.

Das im Kupolofen erschmolzene Basiseisen für Sphäroguß wird in den meisten Fällen vor der Mg-Behandlung entschwefelt, damit die Bildung einer bei der Mg-Behandlung entstehenden und schwer vom Eisen trennbaren MgS-Schlacke vermieden wird. Das Entschwefeln erfolgt üblicherweise in einer Siphonpfanne durch Zugabe von Carbid und Koksgrus.

Bei Einsatz des Konverters wird die Entschwefelung gleichzeitig mit der Mg-Behandlung durchgeführt. Die Badbewegung ist bei der Behandlung mit reinem Magnesium so heftig, daß die MgS-Schlacke ausreichend abgeschieden wird.

Zur Entschwefelung von Kupolofeneisen werden heute drei Verfahren eingesetzt:

1. Die diskontinuierliche Entschwefelung mit einer Schüttelpfanne bei der Zugabe von gebranntem Kalk, Koksgrus und Silizium.

2. Die kontinuierliche Entschwefelung (Durchlaufverfahren) in einer Siphonpfanne mit Spülung durch Stickstoff bei der Zugabe von gebranntem Kalk und Koksgrus.

3. Die kontinuierliche Entschwefelung (Durchlaufverfahren) in einer Siphonpfanne mit Spülung durch Stickstoff bei der Zugabe von Carbid und Koksgrus.

Der Koksgrus wird in einem festen Gewichtsverhältnis zugegeben. Die Zugabemenge entspricht etwa 6 kg Carbid und 2 kg Koksgrus je Tonne Roheisen, wenn beispielsweise eine Entschwefelung von 0,09 auf 0,01% S im Flüssigeisen erreicht werden soll.

Da der Kupolofen im allgemeinen mit saurer Schlacke gefahren wird, ist man im Bedarfsfalle gezwungen, außerhalb des Kupolofens zu entschwefeln. Die vielerorts angewendeten Nachbehandlungsverfahren, wie Schüttel- oder Drehpfanne, haben sich als sehr aufwendig erwiesen und werden daher immer weniger angewendet.

Zunehmend werden die kontinuierlichen Durchlaufverfahren in die Praxis eingeführt. Eine diesbezüglich sehr einfache Methode stellt die spiralförmige Ausbildung des Rinnenauslaufes dar, wobei man das Entschwefelungsmittel, meist Calciumkarbid, in die Rinne aufgibt und durch die Spiralform eine innige Durchmischung beim Einlaufen in das darunterliegende Gefäß erzielt. Die so erzielte Entschwefelung ist jedoch nicht immer ausreichend.

Deshalb wurde für höhere Ansprüche das folgende beschriebene Durchlaufverfahren entwikkelt **(Abbildung 2-8)**. Die erforderliche Durchwirbelung wird dabei durch Einblasen von Stickstoff über einen porösen Bodenstein erreicht. Die Carbidzugabe (etwa 1% der Eisenmenge) erfolgt kontinuierlich und das Eisen wird nach der Schlackenabscheidung dem Vorherd oder einem Rinnenofen zugeführt. Auf diese Weise wird ein guter Entschwefelungsgrad erreicht und die Temperaturverluste sind geringfügig.

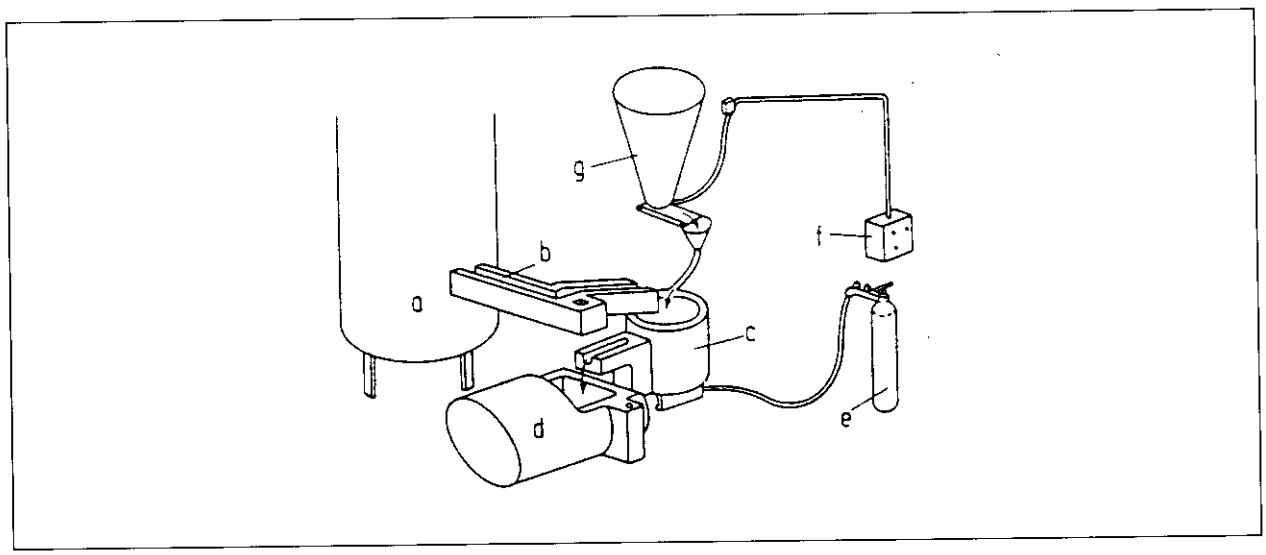


Abb. 2-8: Vorrichtung zur kontinuierlichen Entschwefelung von Gußeisen im Durchlaufverfahren
a) Kupolofen, b) Rinne, c) Zwischengefäß zum Entschwefeln, d) Vorherd,
e) Stickstoffversorgung, f) Zugabesteuerung, g) Zugabe von Calciumkarbid
(Q.: Neumann)

2.4.5 Silizium

Das Siliziumcarbid (SiC) löst sich im flüssigen Eisen und bietet der Schmelze sowohl Silizium als auch zusätzlichen Kohlenstoff an. Mit SiC kann der Ausschuß gesenkt und der Reifegrad erhöht werden.

Silizium gelangt vorwiegend über das Roheisen, den Gußbruch und das Kreislaufmaterial in den Ofen. Zum Aufsilizieren des Stahlschrottanteils und zur Deckung der Verluste muß zusätzliches Silizium aufgegeben werden. Heute wird vielfach mit FeSi-Briketts gearbeitet, wobei die Ferrolegierung in Zement oder ähnlichem eingebettet wird.

Anstelle von FeSi verwendet man in zunehmendem Maße Siliziumcarbid, das einerseits weniger empfindlich in bezug auf die Oxidationsanfälligkeit ist und andererseits metallurgische Vorteile aufweist durch die mit Kohlenstoff kombinierten Reduktionswirkungen, die beim Auflösen in der Überhitzungszone voll wirksam werden.

2.4.6 Phosphor

Hoher Phosphorgehalt steigert die Verschleißfestigkeit des Gußeisens. Ist geringere Verschleißfestigkeit gefordert, muß der Phosphorgehalt verringert werden.

Eine Entphosphorung wird zwar mit einer basischen Schlacke durchgeführt, jedoch müssen gleichzeitig stark oxidierende Bedingungen bei möglichst nicht zu hoher Temperatur vorliegen, die normalerweise im Kupolofen nicht gegeben sind. Aus diesem Grunde läßt sich der mit dem metallischen Einsatz eingebrachte Phosphor nicht aus dem Eisen entfernen. Deshalb sind die Phosphoreinträge nur durch phosphorarme Einsatzmaterialien gering zu halten. Ansonsten muß in einem nachgeschalteten Induktionsofen der Phosphoranteil in der Schmelze aufwendig verringert werden.

2.5 Ofenbetrieb, Betriebssysteme und Komponenten der Kupolofen-Schmelzanlagen

Einsatzmöglichkeiten von Kupolöfen
Der Kupolofenbetrieb zum Erschmelzen von Flüssigeisen hat eine große Anzahl von Einsatzmöglichkeiten. Nachfolgend werden einige wichtige Einsatzmöglichkeiten und Kriterien genannt:

- Bei großen Schmelzleistungen mit einer einheitlichen Eisenanalyse, vor allem GGL und Basiseisen.

- Für Gießereibetriebe, die im Kundenguß für die Automobilindustrie und den Maschinenbau Gußeisen mit Kugelgraphit herstellen.

- Zur Erzeugung von Flüssigeisen (Basiseisen) für niedriggekohlten Temperguß bei den Herstellern von Fittings.

- Bei gleichmäßiger Eisenabnahme im Mehrschichtbetrieb.

- Bei Produzenten von Ofenguß und Kesselteilen sowie bei Gießereien, die Kanalguß (Kanalsteine bilden den Strömungskanal für das Flüssigeisen bei der Zuführung zu den Vergießkokillen) aus Grauguß und ein phosphorhaltiges Eisen aus Gußbruch und Kreislaufmaterialien herstellen.

- Bei den Herstellern von Rohren aus Schleuderguß und von Gießereien, die Kanalguß aus Sphäroguß herstellen und die aus Blechpaketen, Schrott und Roheisen Basiseisen für Sphäroguß in großen Mengen erschmelzen.

Duplexbetrieb
Duplizieren ist der zweistufige Schmelzbetrieb mit getrennten Öfen zum Schmelzen im Kupolofen und zum Überhitzen im Induktionsofen. Der Duplexbetrieb gibt die Möglichkeit, die steigenden Ansprüche an die Qualität des Gußeisens besser umzusetzen.

Die beiden wichtigsten Kombinationen im Kupolofenbetrieb sind die Nachschaltung eines Induktions-Tiegelofens oder eines Induktions-Rinnenofens. Im Induktions-Rinnenofen muß das Rinneneisen bereits auf den gewünschten Kohlenstoffgehalt eingestellt sein. Dieser Ofentyp kann keine Badbewegung herstellen.

Wenn ein häufiger Wechsel der Eisensorte erforderlich ist und Grauguß und Sphäroguß in häufigerem Wechsel erzeugt werden soll, ist der Betrieb des Kupolofens und des Induktions-Tiegelofens im Duplexverfahren sinnvoll.

Das Rinneneisen des Kupolofens kann durch eine Schwenkrinne in einen der beiden Tiegelöfen geleitet werden, die dem Kupolofen nachgeschaltet sind.

2.5.1 Kupolofen-Gesamtanlage

Eine moderne Kupolofen-Schmelzanlage stellt eine eigenständige Fabrik mit verschiedenen teil- oder vollautomatisierten Einzelprozeß-Stufen dar. In **Abbildung 2-9** ist der Aufbau für das Rohstofflager und den Gattierungsbereich und in **Abbildung 2-10** ist eine Gesamt-Kupolofen-Schmelzanlage mit Winderhitzer und Entstaubungsanlage dargestellt. Sie kann in die folgenden Funktionsbereiche gegliedert werden:

Kupolofen und Gattierung:
- Kupolofen mit Schlackensiphon und Rinne,
- Vorherd oder Induktions-Rinnenofen,
- Rohstofflager mit Kranbahn,
- Gattierungsplatz mit Tagesbunker und Kranbahn für
    - die metallischen Komponenten Gußbruch, Roheisen und Stahlschrott sowie den zugehörigen Kreislauf,
    - die Legierungszusätze Ferrosilizium, Ferromangan, SiC-Brikett u. a.,
    - die Zuschläge Koks und Kalkstein;
- Waage für die metallischen Komponenten, Koks und Kalkstein,
- Beschickungskübel und
- Aufzug.

Heißwinderzeugung mit Regelsystem für die Windtemperatur:
- Gasabsaugung am Kupolofen,
- Vorentstaubung mit Zyklon,
- Brennkammer für den Rekuperator,
- Verbrennungsluftgebläse und
- Rekuperator mit Wartungssystem.

Gasreinigung (vor oder hinter dem Rekuperator):
- Vollständige Zuleitung der Gichtgase direkt zur Entstaubungsanlage
- Abzweigung eines Teilstroms der Gichtgase vor der Entstaubungsanlage für die Verbrennung zwecks Windvorwärmung,
- Kühlturm (naß) und
- Staubabscheider (bei Naßsystemen ist Neutralisationsanlage erforderlich).

Schlackengranulierung:
- Granulierungsvorrichtung,
- Absetzbecken,
- Austragvorrichtung und
- Wasserkreislauf mit Neutralisation.

Wasserkreisläufe:
- Wasserkühlung für Kupolofenmantel,
- Wasserkühlung für Düsen,
- Wasserkühlung für Gichtgasabsaugung,
- Wasserzufuhr für Entstaubung und
- Wasserzufuhr für Granulierung.

Steuer- und Leittechnik

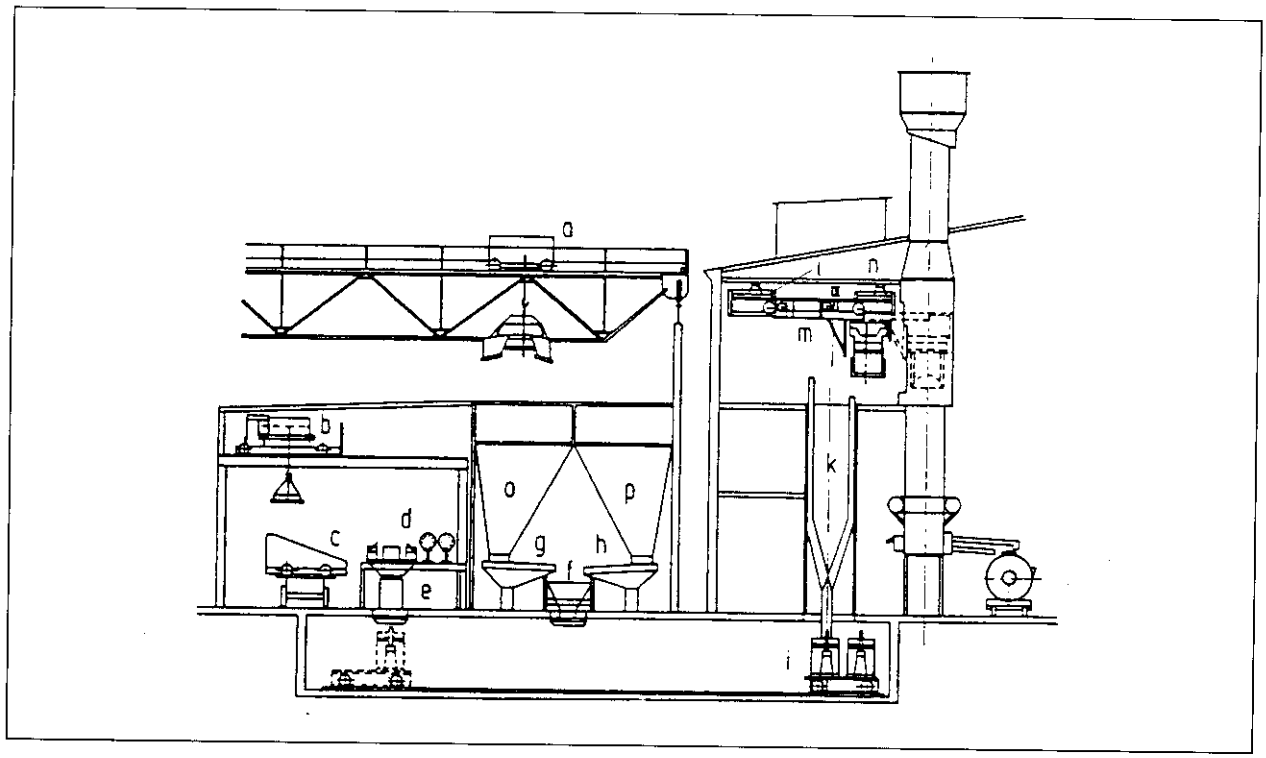


Abb. 2-9: Schema einer Schmelzanlage mit fahrbarem Tagesbunker, Magnetkran und Verschiebewagen

a) großer Kran für Lagerplatz, b) Gattierkran, c) Verschiebewagen, d) Bedienungsstand, e) Schrottwaage, f) Koks-Kalk-Waage, g) Siebförderrinne für Koks, h) Förderrinne für Kalk, i) Förderwagen, k) Aufzugschacht, l) Drehvorrichtung, m) Beschickungskatze, n) Mittellager, o) Koks, p) Kalk (Q.: Neumann)

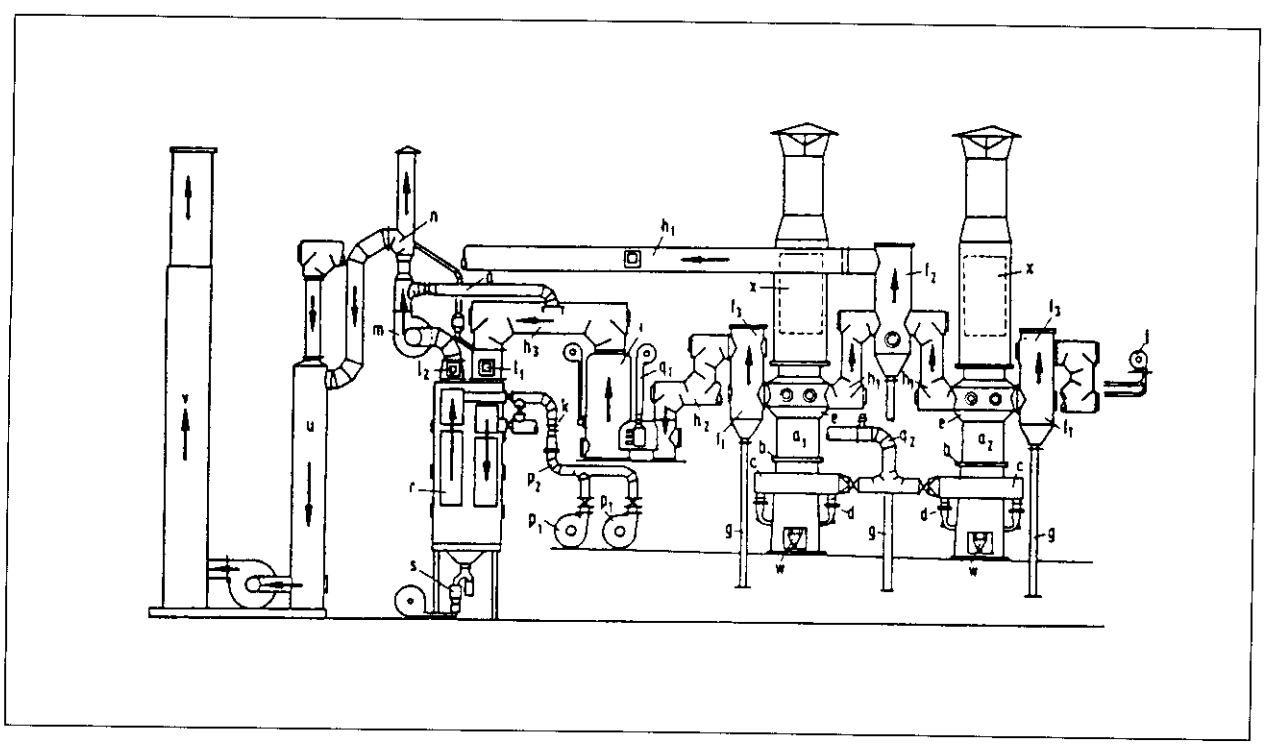


Abb. 2-10: Übersicht über eine Gesamt-Kupolofen-Schmelzanlage mit Winderhitzer und Entstaubungsanlage

a_1) Ofen 1, a_2) Ofen 2, b) Mantelberieselung, c) Windring, d) Düsenstock, e) Gichtgasentnahme, f_1) Staubabscheider für Gichtgas, f_2) Staubabscheider für Restgas, f_3) Gichtgassperre, g) Staubschürre, h_1) Restgaskanal, h_2) Gichtgassammelkanal, h_3) Gaskanal, i) Brennkammer, k) Initialbrenner, l_1) Gaskappe, l_2) Abgaskappe, m) Saugabzug, p_2) Kaltwindleitung, q_1) Verbrennungsluft, q_2) Heißwindleitung, r) Rekuperator, s) Reinigungsanlage, t) Gichtgashöhenanzeiger, u) Gaskühlturm, v) Gasfilterturm, w) Abstichsiphon, x) Beschickungsöffnung (Q.: Neumann)

2.5.2 Gattierung der Einsatzstoffe im Kupolofen

Unter Gattierung ist das fachkundige Zusammenführen oder Anmischen aller zum Schmelzen erforderlichen festen Einsatzstoffe im Schmelzbetrieb zu verstehen. In der Gattierungsanlage werden die Einsatzstoffe des Kupolofens nach vorher festgelegten Rezepten zu Chargen zusammengestellt. Der Kupolofen soll mit möglichst vielen kleineren Chargen beschickt werden, damit der Füllstand nicht zu stark schwankt und homogene Mischungen der Einsatzstoffe in die Schmelzzone gelangen.
Die festen Einsatzstoffe lassen sich prinzipiell in metallische und schlackenbildende Stoffe und die Brennstoffe einteilen. Die metallischen Einsatzstoffe des Kupolofens sind Stahlschrott, Gußbruch, Roheisen-Masseln, Eisenschwamm, Späne und Kreislauf. Als Brennstoff kommt im wesentlichen Koks und zunehmend Gas, aber auch Öl zur Stützfeuerung zum Einsatz. Schlakkenbildende Stoffe sind Kalkstein und Kiesel.

2.5.2.1 Metallische Einsatzstoffe

Der **Stahlschrott** wird sortiert vom Handel angeboten. Die Blechpakete, die aus dem Abfallblech bei der Herstellung von Karosserien anfallen, sind ein hochwertiger Einsatzstoff mit niedrigem Mangangehalt, der für die Herstellung von Sphäroguß geeignet ist.

Der **Schienenschrott** mit höherem Mangananteil ist für die Herstellung von Motorenguß geeignet.

Der **Konstruktionsschrott**, der aus Abfällen von Profilen und Blechen besteht, wird als Einsatzstoff für Grauguß verwendet. Der von der weiterverarbeitenden Industrie als **Stanzabfall** abgegebene Schrott mit bekannter Analyse ist für die Herstellung von Sicherheitsteilen geeignet.

Die verzinkten **Blechpakete** bekommen eine wachsende Bedeutung, seitdem die Automobilindustrie die Karosseriebleche verzinkt. Der Zinkanteil am Schrott liegt in der Größenordnung von 10 kg/t. Zink hat einen Schmelzpunkt von 420 °C und einen Siedepunkt von 908,5 °C. Es wird im Kupolofen vollständig verdampft, in der anschließenden Brennkammer oxidiert und dann im Filtergewebe aufgefangen. Eine negative Auswirkung von Zink und dessen Begleiter auf das Rinneneisen ist nicht festgestellt worden. Die Filter müssen ausreichend groß ausgelegt werden, damit sie den sehr feinen Staub aus Zinkoxid in den relativ großen Mengen aufnehmen können.

Der **Gußbruch** ist ein preiswerter Einsatzstoff im Kupolofen und wird überall da verwendet, wo die Toleranzen der chemischen Zusammensetzung dies erlauben.

Gußbruch wird für alle Graugußsorten verwendet, wobei im allgemeinen 6 Sorten unterschieden werden:

- Kokillenbruch (aus Stahlwerken, sehr dickwandig)
- Maschinengußbruch (größer 10 mm Wanddicke)
- Handelsgußbruch, Bauguß, Kanalisationsguß, Rohrenguß
- reiner Poterieguß, Radiatoren, Ofenteile (nicht verwendet)
- Hartgußbruch
- Brandguß und Rohre (vermindert)

Die **Roheisen-Masseln** werden im Hochofen aus Eisenerz hergestellt. Sie haben eine bekannte Zusammensetzung und wenig störende Begleitelemente. Heißwind-Kupolöfen werden mit möglichst geringen Mengen an Roheisen betrieben, weil das Flüssigeisen auch ohne die relativ teuren Masseln durch Aufkohlung von Schrott hergestellt werden kann. Masseln sind in offene trapezförmige oder flache Formen gegossenes Roheisen aus den Hüttenwerken.

Der **Eisenschwamm** wird durch direkte Reduktion von Eisenerz unter Umgehung der flüssigen Phase hergestellt. Der Eisenschwamm wird als Pellet oder als Brikett geliefert. Es gibt aber nur sehr wenige Gießer, die dauernd mit Eisenschwamm fahren, weil der Preis des Eisenschwamms bisher nicht mit dem Schrottpreis konkurrieren kann.

Die **Kreislaufmaterialien** der eigenen Gießerei sind von besonderem Wert, weil sie schon die geforderte Zusammensetzung aus derselben Schmelzanlage besitzen.

Die **Späne-Briketts** haben einen ähnlichen Wert wie die Kreislaufmaterialien. Die Späne sind Produktionsreste aus der spanenden Bearbeitung der Gußteile. Diese entstehen in den meisten Fällen in derselben Gießerei. Die Späne werden in kaltem Zustand bei hohem Druck brikettiert und in Raten bis 20% der Gattierung zugegeben. Die **losen Späne** aus Gußeisen können in den Ofenherd eingeblasen werden.

2.5.2.2 Brennstoffe

Die Brennstoffe für den Kupolofen sind Koks, Kohle und Erdgas. Überwiegend wird der für die Gießer hergestellte großstückige Gießereikoks verwendet. Koksgrus und zermahlene Kohle können durch die Düsen eingeblasen werden. Der Einsatz von Erdgas als Zusatzbrennstoff ist bisher ohne durchschlagenden Erfolg erprobt worden.

Der **Gießereikoks** wird aus Koks-Kohle mit Zugabe von Pech und Koksstaub hergestellt und etwa 36h so gegart, daß ein großstückiger Koks entsteht. Der für den Einsatz im Kupolofen besonders geeignete Gießereikoks hat eine Körnung von 80–140 mm, einen Kohlenstoffgehalt von 90–91%, einen Aschegehalt von 7 bis 8% und einen Schwefelgehalt von 0,7–0,8%. Diese Werte sind auf den trockenen Koks bezogen. Die Feuchte im Anlieferungszustand beträgt max. 2%.

2.5.2.3 Legierungs- und Zuschlagstoffe

Die Legierungs- und Zuschlagstoffe bestimmen die Eisenzusammensetzung und somit die Gußart wesentlich mit. Außerdem werden mit diesen Stoffen Schwankungen in der Zusammensetzung der Schmelze ausgeglichen (siehe auch Kapitel 2.4).

Wesentliche Legierungs- und Zuschlagstoffe sind Ferrosilizium, Siliziumcarbid und Ferromangan. Von Bedeutung sind auch Ferrochrom, Ferronickel, Ferrophosphor und andere Legierungen. Die Legierungs- und Zuschlagstoffe werden mit dem Gattierungskübel als Bestandteil der normalen Charge dem Ofen zugegeben. Dabei wird eine gute Verteilung und Durchmischung der Stoffe im Chargierkübel angestrebt, um einen gleichmäßigen Ofengang zu erreichen.

Ferrosilizium wird in verschiedenen Konzentrationsverhältnissen in Form von Pellets oder Briketts aus der Hochofenindustrie angeliefert.

Siliziumcarbid wird in stückiger Form, als Briketts oder auch als Abfallstoff aus der Porzellanindustrie oder von alten Schleifscheiben geliefert. Es hat einen so hohen Schmelzpunkt, daß es im Koksbett nicht schmilzt, sondern im Ofenherd vom Eisen gelöst wird. Siliziumcarbid wird vorzugsweise als Brikett in den Kupolöfen eingesetzt.

Ferromangan wird meist in Hochöfen erzeugt und stückig angeliefert, genauso wie die anderen Ferrolegierungen wie Ferrochrom und Ferrophosphor.

2.5.2.4 Schlackenbildner

Schlackenbildner ermöglichen die sog. „Schlackenarbeit", die die Schlacke im Kontakt mit dem flüssigen Metall im metallurgischen Sinne leistet. Man versteht darunter die gegenseitigen chemischen und chemisch-physikalischen Wirkungen zwischen Schlacke und flüssigem Metall. Wichtigster Schlackenbildner ist der Kalkstein.

Kalkstein ist ein Sediment, bestehend aus Kalkspat (Calcit, Calciumkarbonat). Beim Erhitzen zersetzt sich Kalkstein in Calciumoxid (gebrannter Kalk) und Kohlendioxid. Der Kalkstein soll für den Einsatz eine Reinheit <95% besitzen. Seine Korngröße liegt zwischen 40–80 mm. Die saure Koksasche sowie der an dem Kreislauf und Schrott anhaftende Sand und der Abbrand des sauren Futters werden durch den Kalk neutralisiert und eine Schlacke wird hergestellt, die einen ausreichend niedrigen Schmelzpunkt hat. Es ist üblich, eine Menge von Kalkstein zuzugeben, die zwischen 20 und 35% der Koksmenge liegt.

Kies wird verwendet, um die Schlackenmenge zu erhöhen und die Schwankungen der Schlackenmenge auszugleichen, die sich aus dem ungleichmäßigen Zufluß von Verunreinigungen in den Einsatzstoffen ergeben. Der Kupolofen mit einem Futter für Langzeitbetrieb wird normalerweise ohne Zusatz von Kies betrieben.

2.5.2.5 Gattierungsbeispiele

Je nach Ofenart, Gußsorte und spezifischen betrieblichen Randbedingungen werden Kreislaufmaterial, Roheisen und Stahlschrott in den unterschiedlichen Anteilen chargiert. Im Mittel setzen sich die Kupolofenchargen wie folgt zusammen:

- 30 bis 40% Kreislaufmaterial,
- 10 bis 20% Gußbruch,
- 20 bis 50% Roheisen bei Kaltwindbetrieb,
- 10 bis 30% Roheisen bei Heißwindbetrieb,
- 10 bis 20% Stahlschrott bei Kaltwindbetrieb und
- 20 bis 60% Stahlschrott bei Heißwindbetrieb.

Aus Kostengründen ist man bestrebt, Stahlschrott bis an die zulässige Grenze einzusetzen, was dann aber metallurgisch eine gewisse Unruhe und Ungleichmäßigkeit des Ofengangs bewirken kann.

Feuchtes Einsatzmaterial wirft normalerweise keine Probleme auf, da im oberen Schachtteil eine Trocknung eintritt. Auch angerosteter Schrott wird verarbeitet, wobei allerdings zu bedenken ist, daß die Reduktion des Eisenoxids zu einem höheren Koksverbrauch sowie meist auch zu einem höheren Abbrand, also zu mehr Schlacken und Stäuben sowie einem erhöhten Energieverbrauch führt.

Bei der Gattierungsberechnung ist ein Gesamtabbrand der Eisenlegierung von ca. 2% zu berücksichtigen. Die Verluste an Spritzeisen, Pfannenresten, Verschlackung in der Pfanne werden als Gießverlust mit 5% angenommen, der in den gefaßten Reststoffen wiederzufinden ist. Beispielhaft ist nachfolgend die Stoffbilanz eines Heißwind-Kupolofens mit Futter dargestellt:

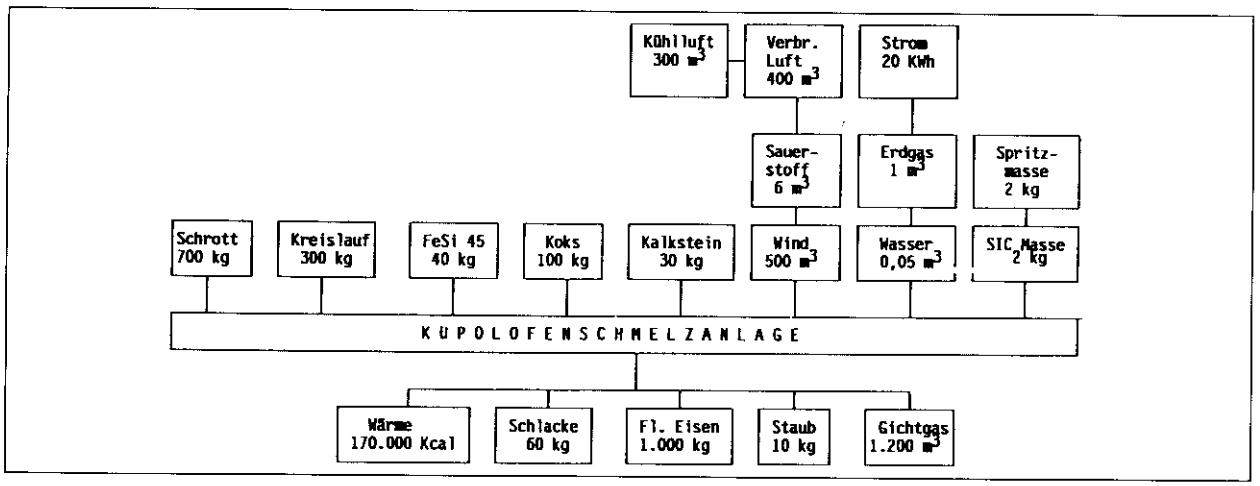


Abb. 2-11: Beispielhafte Stoffbilanz eines Heißwind-Kupolofens mit Ofenfutter für 1000 kg Flüssigeisen (Q.: VDG-Weiterbildung)

2.5.3 Ofenauslegung

Der nachfolgend beschriebene beispielhafte Heißwind-Kupolofen besteht aus dem Ofenkopf, dem Ofenschacht und dem Ofenherd. Der Ofenmantel wird mit Wasser gekühlt. Die in der Gattierung in einem Kübel zusammengestellten Chargen werden von oben in den Ofenkopf eingefüllt.

Der vorgeheizte Wind wird im Windring durch wassergekühlte Kupferdüsen in den Ofenschacht geblasen. Das flüssige Eisen wird im Ofenherd durch Siphone von der Schlacke getrennt und ausgeschleust. Das Gichtgas wird über Ringkammern entweder über eine Obergicht oder Untergicht abgesaugt.

2.5.3.1 Heißwind oder Kaltwind

Der Kupolofen kann mit Kaltwind oder Heißwind betrieben werden. Durch den Einsatz von Heißwind wird die Temperatur des Koksbettes erhöht und eine bessere Aufkohlung erreicht. Der Koksverbrauch wird verringert, wodurch sich ebenso der Staubgehalt im Gichtgas als auch die Ofenausbruchmengen reduzieren lassen.

Dem Kupolofen liegt das **Schachtofenprinzip** zugrunde **(Abbildung 2-12)**. Die satzweise aufgegebene Beschickung wird kontinuierlich geschmolzen. Energieträger ist normalerweise Koks. Der Schnitt zeigt einen Kupolofen im Betriebszustand, der das Gemenge der niedergehenden Beschickung erkennen läßt. Sie besteht im wesentlichen aus dem Brennstoffanteil (Koks) und dem metallischen Einsatz. Die zum Schmelzen erforderliche Energie wird erst im Kupolofen selbst erzeugt.

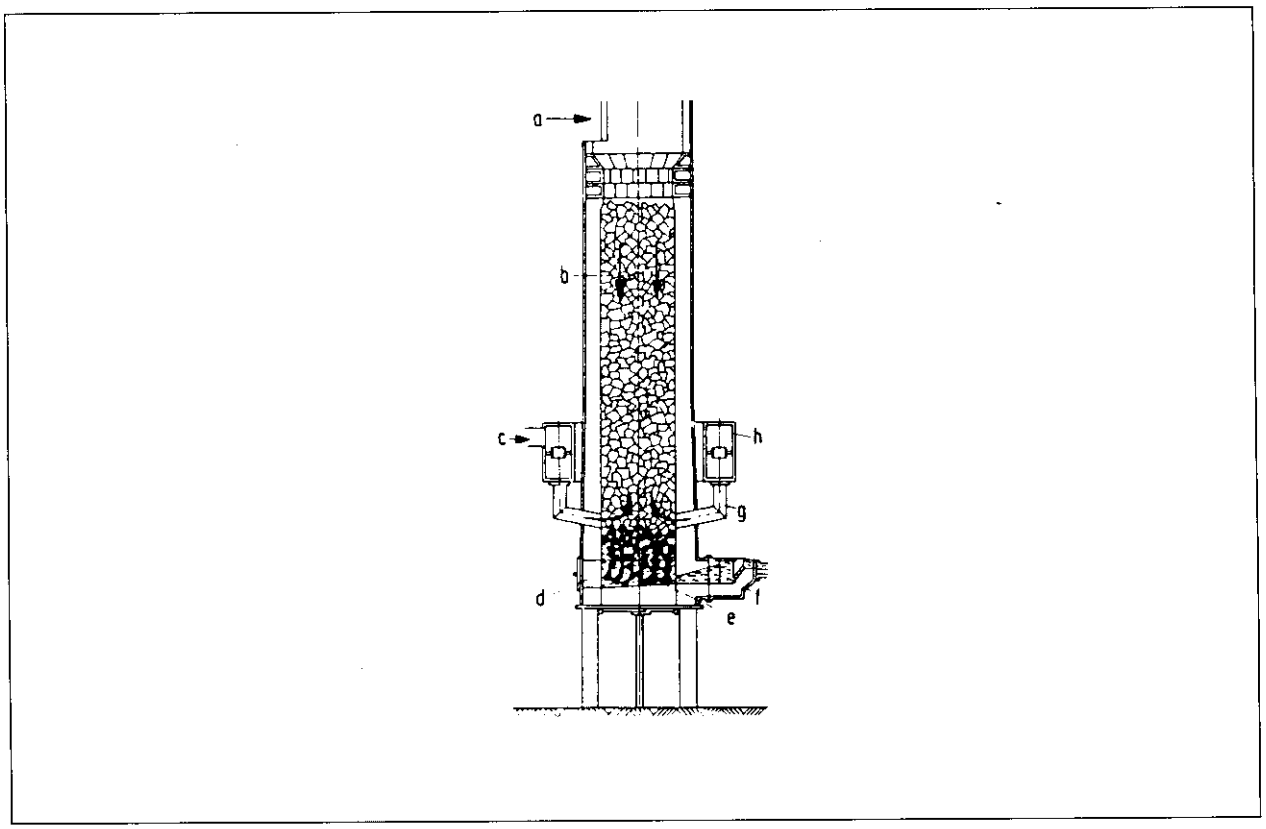


Abb. 2-12: Schachtofenprinzip
a) Zuführung der Beschickung, b) Beschickung (Eisen, Koks und Kalkstein), c) Gebläse, d) Einstiegsöffnung, e) Koksbett, f) Siphon, g) Düsen, h) Windring (Q.: Neumann)

Sowohl der Kaltwind- als auch der Heißwind-Kupolofen weisen den gleichen prinzipiellen Aufbau auf. Da heute bei Kalt- und Heißwind eine vollständige Gasabsaugung aus Gründen des Umweltschutzes erforderlich ist, kann für beide Verfahren die in Abbildung 2-12 ausgewählte Darstellung als Grundkonzeption für den eigentlichen Schachtofen angesehen werden.

2.5.3.2 Ofenauskleidung bzw. Zustellung

Die saure Ofenauskleidung besteht meist im unteren, höher beanspruchten Teil aus relativ sauberer SiO_2-Masse, während im oberen Schachtteil Schamotte oder Klebsand verwendet wird. Der Verbrauch oder Abbrand liegt bei 20 bis 40kg Ofenauskleidung/t Eisen. Bei einem futterlosen Ofen ist der Abbrand mit 2 bis 6 kg/t Eisen bedeutend niedriger.

Die Zustellung bzw. Ofenausmauerung schützt den Stahlmantel des Ofens und unterstützt den Schmelzvorgang. Der Kupolofen kann mit feuerfester Zustellung der Ofenausmauerung ohne wassergekühlte Kupferdüsen betrieben werden und muß dann täglich neu zugestellt werden. Durch den Einsatz von wassergekühlten Winddüsen, die in das Koksbett hineinragen, und durch den Einsatz besserer feuerfester Werkstoffe im Ofenherd sind gefutterte Kupolöfen auch mehrere Wochen ohne hohen Zustellungsaufwand in Betrieb.

2.5.3.3 Ofenabdichtung

Die wassergekühlte Tasse in Höhe der Gichtgasabsaugung bildet mit dem aufgesetzten Einfüllschacht den Stopfen des Ofens, der das Eindringen von Falschluft verhindern soll. An der Absaugöffnung wird ein schwacher Unterdruck von weniger als 1 mbar aufrechterhalten, so daß die darüberstehende Beschickungssäule zur Abdichtung meist ausreicht.

2.5.3.4 Schachthöhe

Die Schachthöhe ergibt sich aus der Wirksamkeit des Wärmeaustausches. Die Erfahrungswerte zeigen, daß ein spezifisches Schachtvolumen für den sauer ausgekleideten Ofen zwischen 0,6 bis 0,8 m^3/t Flüssigeisen in der Stunde eine gute Wärmenutzung gewährleistet. Dies hängt natürlich von den Strömungsverhältnissen bzw. von der Beschaffenheit des Einsatzmaterials ab. Der Abstand zwischen Düsenebene und Gasentnahme liegt meist bei 4 bis 5 m. Der Querschnitt des Ofenschachtes in der Düsenebene wird auf der Basis der optimalen Windmenge berechnet, die je nach Kokssatz für eine spezifische Schmelzleistung von 8 t/m^2h bis 12 t/m^2h und eine Windmenge von 100 bis 120 m^3/m^2 min ausgelegt wird. Die Gestelltiefe beträgt beim sauer ausgekleideten Ofen 600 mm bis 900 mm. **Abb. 2-13** zeigt beispielhaft die Abmessungen eines sauer ausgekleideten Kupolofens.

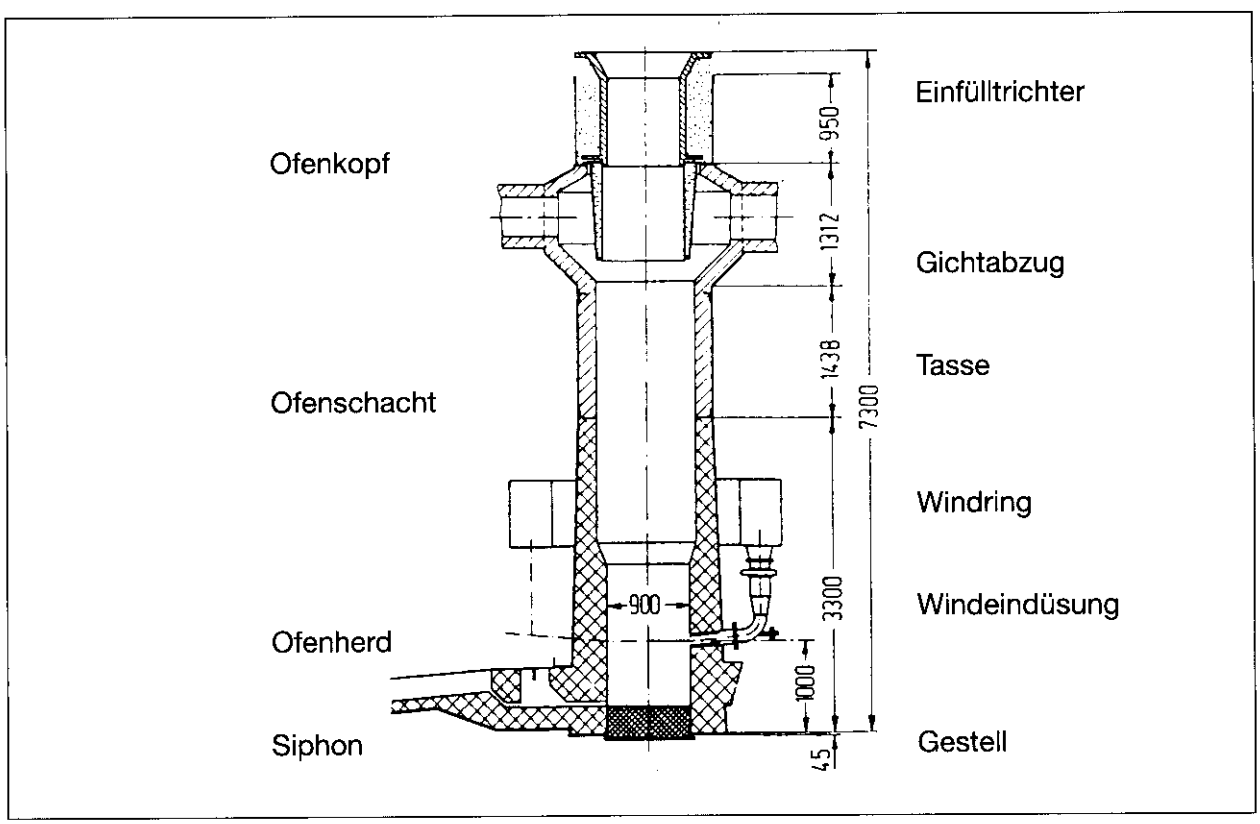


Abb. 2-13: Aufbau und Abmessungen eines sauer ausgekleideten Kupolofens
(Die eingetragenen Maße in mm sind auf eine Auslegung für 6 t/h bezogen) (Q.: Ußleber)

2.5.3.5 Langzeitbetrieb durch futterlosen Ofenschacht

Der Kupolofen kann mit einem für den Langzeitbetrieb ausgelegten isolierenden Futter im Ofenschacht, aber auch ohne Futter betrieben werden. Bei futterlosem Betrieb werden längere Ofenreisen gefahren und der Aufwand der Zustellung im Ofenschacht entfällt. Nur das Gestell ist ausgemauert. Beim futterlosen Ofen wird die Wärme an der Außenwand durch Berieselung mit Wasser abgeführt. Diese Wärmeverluste müssen durch einen erhöhten Kokszusatz (etwa 2–3 %) ausgeglichen werden. Dadurch erhöhen sich die Gichtgas- und Koksgrusstäube, der Anfall von Ofenausbruch verringert sich erheblich, die Schlackenmenge bleibt etwa gleich.

Deshalb sind Kupolöfen mit warmfesten Futter als Langzeitvariante ohne Wasserkühlung sicherlich die reststoffärmeren Varianten. Die **Abbildung 2-14** zeigt den zusätzlichen Kokszusatzbedarf in Abhängigkeit von der Blechmanteldicke für verschiedene Kühlvarianten.

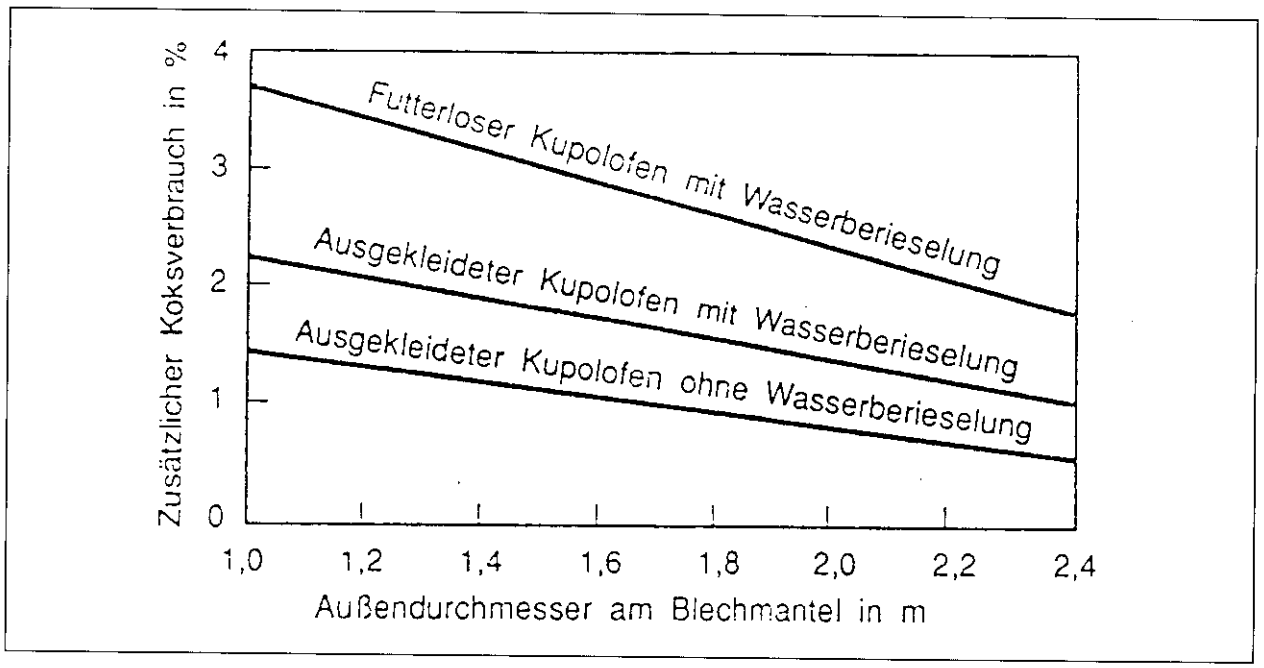


Abb. 2-14: Zusatzkoksmengen zum Ausgleich der Wandverluste mit und ohne Wasserberieselung

2.5.3.6 Gichtgasreinigung

Wegen der Vorschriften zur Reinhaltung der Luft gehören heute die Einrichtungen zur Verbrennung des Gichtgases und zur Reinigung des Rauchgases zu jeder Schmelzanlage. Der Unterschied der Investitionskosten für einen Kaltwindofen und einen Heißwindofen sind daher gering geworden.

Behandlung und Verbrennung des Gichtgases
Das Gichtgas des Kupolofens wird unterhalb der Begichtungsöffnung aus einer Ringkammer abgesaugt. Das Gichtgas des Kupolofens kann zuerst gewaschen und dann verbrannt werden. Die relativ sauberen heißen Rauchgase werden in einem Wärmetauscher zur Erhitzung des Windes eingesetzt.

Das Gichtgas kann aber auch im ungereinigten Zustand verbrannt werden. Die brennbaren Bestandteile des Rauchgases werden zur Erhitzung des Windes mitgenutzt. Der Grobstaub wird in einem Wirbler abgeschieden. Das Gichtgas wird mit Verbrennungsluft gemischt und in der heißen Brennkammer gezündet. Die Temperatur des Rauchgases wird durch die Zugabe von sekundärer Verbrennungsluft geregelt.

Das Rauchgas wird in dem Winderhitzer und in der Anlage zur Abwärmenutzung auf eine maximal zulässige Temperatur gekühlt, die für das Filter verträglich ist. Das gekühlte Rauchgas wird in einem Schlauchfilter gereinigt. Die abgeschiedene Gichtgasstaubmenge liegt zwischen 6 und 12 kg/t Flüssigeisen. Das gereinigte Rauchgas wird von einem Saugzug gefördert und durch einen Kamin in die Atmosphäre geleitet.

2.5.3.7 Siphone zum getrennten Abstich des Gußeisens und der Schlacken

Eisen und Schlacke sind im Ofenherd nach ihrem spezifischen Gewicht übereinander geschichtet, wobei die Schlacke auf dem Eisen schwimmt.

Der Kupolofen kann mit einem offenen, unter atmosphärischem Druck stehenden Eisensiphon und einem getrennten Schlackensiphon oder mit einem Drucksiphon betrieben werden, der einen gasdicht abschließenden Deckel hat und in dem der Ofendruck herrscht. Das Fließverhalten der Schlacke wird durch die Zugabe von Kalkstein günstig beeinflußt, wodurch sich aber die Schlackenmenge vergrößert. In modernen Kupolöfen werden zunehmend Drucksiphone zur Intensivierung der Schlackenarbeit und zur Trennung der Schlacke vom Flüssigeisen eingesetzt.

Drucksiphon

Die Schlackenarbeit (chemisch-physikalischer Austausch zwischen Schlacken- und Eiseninhaltsstoffen) findet bei den Drucksiphonen auf dem Weg durch den Siphon statt. Beim Arbeiten mit Drucksiphon **(Abbildung 2-15)** läuft das Eisen ohne Sumpfbildung im Ofen aus. Somit wird das Siphonprinzip, d.h. die Schlackentrennung nach außerhalb des Ofens verlegt. Schlacke und Eisen fließen gemeinsam in den Drucksiphon, so daß auch keine Gefahr mehr besteht, daß die Schlacke bis in die Düsenebene ansteigen kann. Dieses Prinzip wirkt sich günstig auf das Aufkohlungs- und Aufschwefelungsverhalten aus, da der Reaktionsweg zwischen Flüssigeisen und Schlacke durch den Drucksiphon verlängert wird.

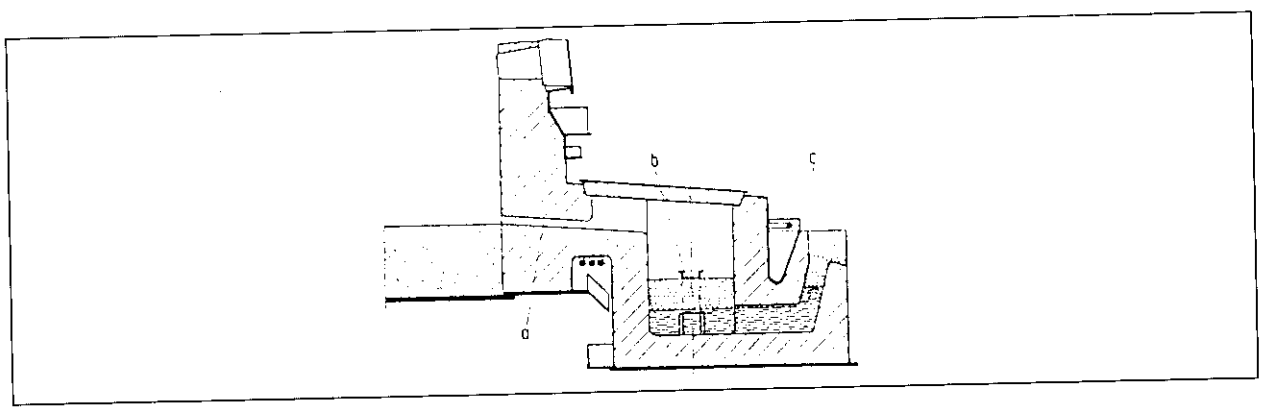


Abb. 2-15: Drucksiphon mit Wasserkühlung zur Verbesserung der Haltbarkeit der Zustellung
a) Abstichkanal, b) Eisenüberlauf, c) Schlackenablauf (Quelle: Höhle)

Neben den verbesserten metallurgischen Auswirkungen liegt der Vorteil des Drucksiphons vorwiegend auf der betriebstechnischen Seite. Das Futter im Gestell wird weniger als üblich beansprucht und kann auch bei futterlosen Öfen sauer ausgeführt werden. Dadurch werden die Futterstandzeiten erhöht, wodurch geringe Ofenausbruchmengen entstehen.

Wegen der gleichmäßigen Beanspruchung und der Möglichkeit, den Außensiphon an den kritischen Stellen zu kühlen, erreicht man eine Siphonlaufzeit von fünf Arbeitstagen. Der Drucksiphon kann nach seiner vollständigen Abkühlung am Wochenende zugestellt werden. Bei großen Öfen werden oft zwei Drucksiphons installiert, die wechselweise betrieben werden. Durch den kontinuierlichen Langzeitbetrieb auch der Siphone werden Siphonausbruchmengen verringert.

2.5.3.8 Mantelkühlung

Zum Einsatz kommen Kühlsysteme mit einfach und doppelwandig ausgeführten Ofenköpfen, in **Tab. 2-2** sind unterschiedliche Systeme gegenübergestellt..

Das Kühlwasser wird im ersten Fall aus dem Kaltwasserbecken in den Ofenkopf gepumpt. Es fließt über den Ofenmantel in die Auffangschale und danach in das Warmwasserbecken. Aus dem Warmwasserbecken wird das Wasser in den Kühlturm gepumpt und von dort im Kreislauf in das Kaltwasserbecken zurückgeleitet.

Bei doppelwandig ausgeführten Ofenköpfen strömt das Kühlwasser aus einer Ringleitung durch mehrere Stichleitungen in das untere Ende der Ringkammer. Es verläßt den Ofenkopf durch mehrere Stichleitungen am oberen Ende der Einwurfschüssel, die in einer Ringleitung enden. Das Wasser fließt dann durch das Einlaufstück der Gichtgasleitung zum Ofenmantel und kühlt diesen.

Es muß eine Menge von etwa 10m^3 Wasser je Meter Ofenumfang zur Verfügung stehen. Die Wassermenge, die durch den Ofenkopf fließt, ist um 25–50% größer als bei einfach ausgeführten Ofenköpfen.

Kaltwindkupolofen	Heißwindkupolofen		
	HW-Ofen mit Futter	HW-Ofen mit Futter	HW-Ofen futterlos
nur noch vertretbar - bei ständigem O_2-Zusatz von 3 bis 5% (dann mit wassergekühlten Kupferdüsen) - mit sekundärer Düsenreihe für CO-Nachverbrennung	ohne Mantelkühlung	mit Mantelkühlung	mit Mantelkühlung
	← wassergekühlte Kupferdüsen →		
		ggf. Shuttlebauweise	
		← Langzeitofen →	
← täglicher Ofenwechsel →		← Betriebsdauer 3 bis 12 Wochen →	
← kombinierter Eisen- und Schlackensiphon →		← mit getrenntem Schlackensiphon →	
		← oder Drucksiphon →	
		ggf. mit O_2-Zusatz zur Betriebsoptimierung, d. h. Leistungsanpassung (rechnergesteuert) bei vermindertem Gichtgasausstoß	
	← Koksverbrauch steigend →		

Tab. 2-2: Betriebssysteme koksgefeuerter Kupolöfen (Q: Gießerei)

2.5.3.9 Entstaubungssysteme

Die Vielzahl der Entstaubungssysteme an Kupolofenanlagen lassen sich grundsätzlich in die folgenden Systemgruppen einteilen:

1. Massenkraftabscheider
2. Filternde Abscheider
3. Elektrische Abscheider (naß oder trocken)
4. Naßabscheider (Nieder-, Mittel- oder Hochdruck)

Für die Trockenentstaubung können Trockenelektrofilter, Schlauchfilter bzw. Gewebefilter oder Zyklone bzw. Fliehkraftabscheider eingesetzt werden. Bei der nachgeschalteten Naßentstaubung kommen Naßelektrofilter, Venturiwäscher, Theisenwäscher bzw. Desintegrator und zahlreiche Sonderkonstruktionen in Betracht.

Der erforderliche Entstaubungsaufwand hängt von dem vorwiegend metallhaltigen Feinstaubanteil ab. Die Koksstäube sind relativ grob und leicht abzuscheiden.

Je nach Kokssatz werden pro Tonne erzeugten Eisens 700 bis 1 200 m^3 Abgas erzeugt, die den Feinanteil des Kokseinsatzes als Staub mitreißen. Die folgende **Tabelle 2-3** zeigt Beispiele für den Staubauswurf in verschiedenen Kupolofenvarianten.

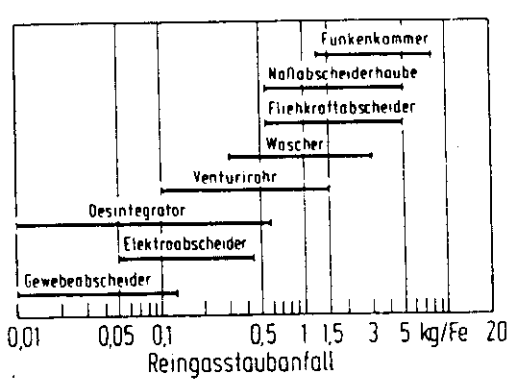
Ofenart	Staub-Gesamtauswurf in kg/t Flüssigeisen	Auswurf- größe [µm]	Auswurf- menge [kg/m^3]	Kokssatz [%]
Kaltwind-Kupolofen	5 bis 13	< 63	2 bis 4	ca. 14
Heißwind-Kupolofen	3 bis 17	< 63	2 bis 6	ca. 10
Kupolofen mit Öl- oder Erdgaszusatzfeuerung und Kaltwind-Kupolofen mit Sekundärluft	ca. 3	–	–	8
Erdgasgefeuerter Kokskupolofen (System Henza)	ca. 2	–	–	4 bis 5
Öl- oder erdgasgefeuerter koksloser Kupolofen	ca. 0,8	–	–	0

Tab. 2-3: Staubauswurf in Abhängigkeit vom Kokssatz und von der Ofenart (Q.: VDG-Weiterbildung)

Die erfaßten Staubmengen betragen insgesamt 3 bis 17 kg/t Flüssigeisen je nach Bauart des Kupolofens.
Es sind zahlreiche Staubabscheideverfahren entwickelt worden. Die **Tabelle 2-4** vermittelt die Leistungsfähigkeit verschiedener Staubabscheidesysteme, wie sie an Heiß- und Kaltwind-Kupolöfen eingesetzt wurden. Nur Hochleistungsabscheider gewährleisten die heute geforderten niedrigen Werte für die Staubkonzentrationen im Reingas. In **Tabelle 2-5** sind technische und wirtschaftliche Angaben zu einigen trockenen und nassen Staubabscheidern dargestellt.

Abscheider für Grobstaub
Der Abscheider für den Grobstaub ist meistens ein Fliehkraftabscheider. Das Gichtgas wird in einer Gasleitung vom Ofenkopf zu der Brennkammer gefördert. Die Staubfraktion mit der Körnung kleiner 0,1 mm fliegt mit dem vorgereinigten Gas in die Brennkammer. Der Staub größer als 0,1 mm wird durch den Abscheider ausgetragen, dies entspricht der Hälfte des angefallenen Staubes. Der ausgetragene Staub kann gesammelt und deponiert werden. Er enthält noch brennbare Bestandteile. Er kann durch die Winddüsen in den Ofen zurückgeblasen werden. Zur Zeit laufen Versuche, die Staubmengen durch Rückführung auch der Feinstäube in die Düsen zu vermindern.

Emissionsart und Entstauber	Wahrscheinlichste Werte (Klammerausdruck Streubereich)			Arithmetische Mittelwerte (Klammerausdruck gewichtete Mittelwerte)		
	Kaltwind-kupolöfen	Heißwindkupolöfen fremdbeheizt beheizt	Heißwindkupolöfen gichtgas-beheizt	Kaltwind-kupolöfen	Heißwindkupolöfen fremd-beheizt	Heißwindkupolöfen gichtgas-beheizt
Staubanfall ohne Staubabscheidung	5,0 (2,4 bis 10,1)	2,0 bis 8,0 (Annahme)	3,5 (1,5 bis 7,9) (m. Teilgasabs.)	5,8 (5,9)	6,5 (6,4)	4,1 (4,5)
Reingasstaubanfall						
mit Funkenkammer	4,3 (2,1 bis 8,6)		4,0 ± 1,5 (Annahme)	4,8 (4,8)		3,9 (3,6)
Fliehkraftabscheider	1,7 (1,1 bis 2,7)		k. Angabe mögl.	1,8 (1,8)		–
Naßabscheiderhaube	2,0 (1,1 bis 3,5)		1,4 (1,0 bis 2,0) (Annahme)	2,1 (2,0)		1,5 (1,5)
Wascher	1,0 (0,3 bis 2,7)		k. Angabe mögl.	1,2 (1,2)		–
Venturirohr	0,33 (0,11 bis 0,85)			0,43 (0,35)		
Desintegrator	0,10 (0,03 bis 0,25)			0,14 (0,10)		
Gewebeabscheider	0,04 (0,01 bis 0,10)			0,05 (0,03)		
Elektroabscheider	0,14 (0,01 bis 0,28)			0,15 (0,14)		
Gasanfall Kohlenmonoxid,	36 (12 bis 105)	94 (31 bis 278)	28 (11 bis 74)	46 (46)	125 (147)	35 (35)
Schwefeldioxid	(0,2 bis 0,5) (Annahme)			–	–	–



Tab. 2-4: Emissionsfaktoren des Staub- und Gasauswurfs in kg/t Fe (Q.: Neumann)

Tab. 2-5: Technische und wirtschaftliche Angaben von Staubabscheidern (Q.: VDI-Richtlinie 2288)

Technische und wirtschaftliche Angaben		Trockenabscheider			Naßabscheider		
		Vielzellen-Fliehkraft-abscheider	Trocken-elektro-entstauber	Gewebe-filter	Naßwäscher mit feststehenden und rotierenden Einbauten	Venturi-Wäscher	Naßelektro-entstauber
Erreichbarer Reingasstaubgehalt	mg/m³	500 bis rd. 300	300 bis 50	rd. 20	1500 bis 50	350 bis 120	150 bis 50
Abscheidegrad	%	75 bis 95	95 bis 99	99 bis 99,9	70 bis 99	92 bis 98	95 bis 99,5
Druckverlust d. Abscheidegeräts	mm WS	60 bis 120	rd. 10	80 bis 180		800 bis 1400	40 bis 60
Energiebedarf einschl. Pumpen	kWh/1000 m³ Abgas	1 bis 1,5	0,1 bis 0,3	1,2 bis 2,5	2 bis 10	5 bis 8	1,5 bis 3
Neuwasserverbrauch bei Umlaufbetrieb	m³/1000 m³ Abgas	nur bei Verdampfungskühlung rd. 0,05	rd. 0,05	rd. 0,05	0,3 bis 0,5	0,2 bis 0,3	0,15 bis 0,25
Max. Filtereintrittstemp.	°C	max. 600	400	250	Kühlung über Sättigung		
Anlagenkosten einschl. Wasserumlauf		niedrig	hoch	mittel bis hoch	niedrig bis hoch	niedrig bis mittel	hoch
Vorteile		robust, wenig störanfällig, geringer Platzbedarf	geringer Energieverbrauch, hoher Abscheidegrad	hoher Abscheidegrad		mäßige Anlagekosten bei gutem Abscheidegrad, geringer Platzbedarf	Verringerung der Verpuffungsgefahr, hoher Abscheidegrad
Nachteile		geringe Abscheidefähigkeit für Feinkorn	zusätzliche Sicherheitsvorrichtungen beim Reinigen brennbarer Gase	Empfindlichkeit der Filterschläuche gegen Temperatur und Verschleiß	bewegte Teile im Gasstrom, hoher Energiebedarf	hoher Energiebedarf	hohe Anlagenkosten durch Nebenanlagen
Gemeinsame Kennzeichen der trockenen Verfahren und der nassen Verfahren		geringe Korrosionsanfälligkeit; niedrige Wartungskosten; kein Abwasser; keine Kondensatwolken über Kamin; hohe Reingastemperatur, daher günstige Bedingungen für Nachverbrennung im Rekuperator und Ausbreitung in der Atmosphäre; trockener Staubanfall; Gefahr der Taupunktunterschreitung bei Verdampfungskühlung;			teilweise oder hochgradige Auswaschung gasförmiger Bestandteile, besonders Schwefeloxide; durch niedrige Betriebstemperatur kleinere Filtereinheiten bei gleichen abs. Gasmengen; geringe Verpuffungsgefahr; Staubanfall als Schlamm; durch Feuchtigkeitssättigung ungünstige Bedingungen für Nachverbrennung im Rekuperator und Ausbreitung in der Atmosphäre; Korrosionsgefahr, daher hoher Wartungsaufwand und Notwendigkeit der Alkalisierung des Umlaufwassers, pH-Wert des Zulaufwassers min. 9; Abwasserbeseitigung;		

2.5.3.10 Schlackenaufbereitung

Die Schlacke des Kupolofens kann naß oder trocken aufbereitet werden. Im einfachsten Fall fließt die Schlacke in einen gußeisernen Kübel und erstarrt dort. Die Schlackenbrocken werden mechanisch zerkleinert bzw. aufbereitet und verwertet. Der flüssige Schlackenstrom wird in einigen Anlagen im Wasserstrahl granuliert, das aufbereitete Granulat wird verwertet (siehe Kapitel 4.3).

2.6 Winderhitzersystem

Die wesentlichen Bauteile der Winderhitzersysteme sind der Winderhitzer selbst, die Heißwindleitungen und Kupferdüsen. Sie bilden ein System zur Erwärmung und Zuführung des Heißwindes in den Kupolofen.

Der **Winderhitzer** ist im allgemeinen ein konvektiver Röhren-Wärmetauscher. Der Wind wird durch die Rohre des Wärmetauschers gefördert. Das heiße Rauchgas von der Brennkammer wird außen um die Rohre geführt. Die Oberfläche der Rohre wird durch Rußbläser oder einen Kugelregen sauber gehalten. Der Wärmetauscher für die Winderhitzung ist üblicherweise in den Rekuperatorturm eingebaut und besteht aus zwei, drei oder vier Zügen. Die Temperatur des heißen Rauchgases (Gichtgas) am Eintritt in den Wärmetauscher wird konstant bei etwa 800 °C gehalten. Die Temperatur des Rauchgases am Austritt schwankt zwischen 500 und 600 °C, je nach der anfallenden Gasmenge. Die Frischluft wird von 30 °C am Eintritt auf eine mittlere Temperatur von 550 °C am Ausgang des heißen Zuges gebracht.

Die **Heißwindleitung** und der Windring dienen zur Förderung des erhitzten Windes und zur Verteilung des heißen Windes durch die Düsen in die Schmelzzone des Ofens.

Die **Kupferdüsen** leiten den Wind in die Koksschicht. Die Anzahl der Düsen wird so gewählt, daß eine gleichmäßige Windverteilung über den Umfang des Ofenmantels erreicht wird. Die Kupferdüsen ragen in den Ofenraum.

Beim Heißwindofen verwendet man wassergekühlte Düsen aus Kupfer, während beim Kaltwindofen vielfach gußeiserne Einsätze in Betrieb sind. Für die Kupferdüsen wird oft ein vollständig geschlossener Kreislauf für das Kühlwasser der Düsen vorgesehen, in den keine Fremdkörper eindringen dürfen. Die an das Kühlwasser der Kupferdüsen abgegebene Wärme beträgt 2,5–5 % der gesamten in dem Kupolofen erzeugten Wärme. Es besteht die Möglichkeit, diese Wärme zu nutzen durch die Erwärmung von Luft mittels einem Rippenrohr-Wärmetauscher. Die Warmluft wird zur Erwärmung der Gießereigebäude eingesetzt.

2.7 Speichern und Warmhalten

Über die Abflußrinnen der Kupolofensiphone verläßt das Flüssigeisen den Kupolofen. Dieses Flüssigeisen wird auch als Rinneneisen bezeichnet. Die Eisenrinnen sind Blechwannen mit feuerfester Zustellung. Das Flüssigeisen wird in einem elektrisch beheizten oder in einem unbeheizten Vorherd gesammelt.
Der Eisenverbrauch der Formanlage ist schwankend und hängt von dem Gewicht und der Stückzahl der Teile ab, die in der Formanlage hergestellt werden. Es wird also ein Speicher für flüssiges Eisen gebraucht. Die Zusammensetzung des Eisens wird in engen Grenzen konstant gehalten.

Der **unbeheizte Vorherd** hat eine Fassung, die etwa der stündlichen Leistung des Kupolofens entspricht. Das Eisen wird aus dem Vorherd in die Gießpfannen gefüllt und aus den Gießpfannen in die Formkästen gegossen.

Rinnenofen
Bei größeren Kupolöfen wird zum Speichern und Warmhalten der Rinnenofen eingesetzt. Die Rinnenofenkapazität hängt im wesentlichen von dem erforderlichen Flüssigeisenpuffer ab. Diese hängt von der Betriebsorganisation, der Anlagenkonzeption sowie von der Struktur des Fertigungsprogramms im Gießereibetrieb ab. Die erforderlichen Pufferzeiten liegen zwischen 30 Minuten und einer kompletten Schichtzeit. Bei optimiertem Zusammenspiel kann der Verbrauch zum Warmhalten durch den Einsatz eines Rinnenofens sehr niedrig sein.
Ein zweiter Rinnenofen wird oft zusätzlich zur Speicherung von Basiseisen und nachfolgender Erzeugung von Sphäroguß verwendet. Die Gießerei verfügt dann über einen dauernden Vorrat an Basiseisen für Grauguß und Sphäroguß. Der Betrieb eines Kupolofens mit zwei Rinnenöfen bietet ein sehr hohes Maß an Flexibilität. Mehrere Formanlagen können so aus einem zentralen Schmelzbetrieb mit den verschieden gängigen Eisensorten versorgt werden.
(Näheres hierzu im Band „Reststoffe aus Induktionsofenschmelzanlagen für Gußeisen".)

2.8 Anlage zur Nutzung der Abwärme mit Thermoöl

Thermoöl wird als Wärmeträger benutzt, um das Rauchgas zu kühlen und um verschiedene Wärmeverbraucher mit Abwärme zu versorgen. Das heiße Thermoöl wird verwendet, um Heizungswasser oder Duschwasser zu erwärmen oder um mit Warmluft Gußteile nach dem Anstrich sowie Gießereisand zu trocknen. Thermoöl wird anstelle von Wasser als Wärmeträger verwendet, weil dieses bessere Möglichkeiten der Nutzung der Wärme bietet. Die nutzbare Temperaturdifferenz bei Thermoöl liegt bei 100–250 °C und für Wasser nur zwischen 70–90 °C.

3 Abfallarten – Entstehung, Aufkommen und Entsorgungsweg

In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten Abfallarten, die in Kupolofenschmelzbetrieben anfallen, nach Entstehung, Inhaltsstoffen und vorgeschriebener Entsorgung beschrieben.

Diese sind:

- Kupolofenschlacken
- Rinnenofenschlacken
- Gichtgasstäube
- Ofenausbrüche
- Koksgrus oder Koksabrieb
- Sonstige Stäube

3.1 Kupolofenschlacken

Beim Erschmelzen von Gußeisen werden Eisenträger, Zuschläge, Schlackebildner und Schmelzhilfsmittel zusammen mit dem Koks und sonstigen Störstoffen (z. B. Sandanhang aus Kreislaufschrott) in den Kupolofen chargiert und verflüssigt. Die Kupolofenschlacken (Abfallschlüssel 31202) entstehen bei der Trennung der Störstoffe und Schlackebildner vom flüssigen Gußeisenprodukt. Sie fallen entweder als Granulat (im Wasserstrahl abgekühlt) oder als Stückschlacke (trocken erstarrt) an.

In der Schlacke binden sich Silizium, Schwefel und Asche aus der Kohle sowie Futterabbrand, Verschmutzungen und Calcium. Ebenso werden metallische Bestandteile wie Eisenoxid, Mangan, Magnesium und Spuren von Blei, Kupfer, Nickel, Chrom und Zink in die flüssige Schlakke eingelagert.

Die Schlackenmenge wird beeinflußt von den Einsatzstoffen, der Ofenart, der Betriebsweise sowie der Qualität der Zustellung (Ofenausmauerung). Der durchschnittliche spezifische Schlackenanfall liegt bei etwa 50–100 kg Schlacke/t Gußeisen. Die jährlich zu entsorgende gesamte Schlackenmenge aus allen Eisengießereien in Baden-Württemberg beträgt ca. 40000 Tonnen. Die allein aus Kupolöfen zu entsorgende Schlackenmenge wird auf ca. 30000 t/a geschätzt.

Die Kupolofenschlacken sind nicht in der Abfallbestimmungsverordnung (AbfBestV) aufgeführt und demnach nicht besonders überwachungsbedürftig. Sie werden in der Regel auf Hausmülldeponien entsorgt.

Die chemische Zusammensetzung einer üblichen Kupolofenschlacke ist in Verbindung mit den Bildungskomponenten in der **Abbildung 3-1** zusammengestellt. Mit zunehmendem Verbrennungsverhältnis ($CO_2 \times 100 : CO_2 + CO$) im Kupolofen steigen der FeO-Anteil und der Abbrand. Die Bildungskomponenten der Schlacken sind Siliziumoxid (SiO_2), Aluminiumoxid (Al_2O_3), Calciumoxid (CaO), Eisenoxid (FeO) und Manganoxid (MnO). Diese werden aus Ofenfutter, Sandanhang, Kalk, Koksasche und dem Abbrand herausgelöst und in die Schlacke eingebunden.

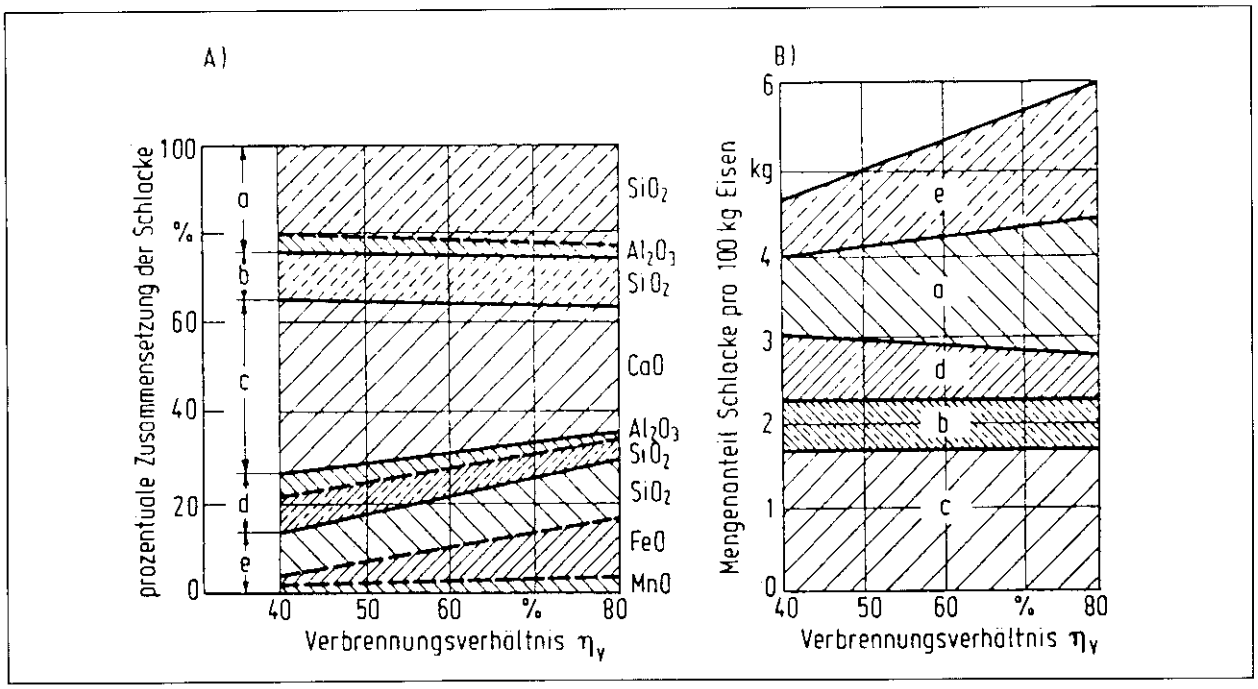


Abb. 3-1: Zusammensetzung von Kupolofenschlacken in Abhängigkeit vom Verbrennungsverhältnis
A) relative Zusammensetzung, B) absolute Mengenanteile; a) Futter, b) Sandanhang, c) Kalk, d) Koksasche, e) Abbrand (Q.: Neumann)

Die Schlackenmenge, die nach **Abbildung 3-1** etwa 5 bis 6 % der Flüssigeisenmenge beträgt, ist außer vom Abbrand in starkem Maße vom Kalksteinzusatz abhängig. Sie steigt beispielsweise von 5,5 % Schlacke (bezogen auf Gußeisenprodukt) bei 3 % Kalksteinsatz und auf 8,5 % Schlacke bei 6 % Kalksteinsatz an. Ein überhöhter Kalksteinsatz hat einen verstärkten Futterausbrand zur Folge, was ebenfalls ein zusätzlicher Grund für das Ansteigen der Schlakkenmenge ist.

Die Zusammensetzung der Schlacke kann je nach Schmelztechnik und der zu erzeugenden Gußeisensorte in den nachfolgenden Bereichen sehr stark schwanken:

Komponenten als Oxide		Durchschnittswerte %
Silizium	SiO2	25–60
Eisen	FeO	10–20
Mangan	MnO	2–4
Calcium	CaO	20–40
Magnesium	MgO	1–3
Aluminium	AL_2O_3	2–60
Blei	PbO	0,0005–0,05
Kupfer	CuO	0,003–0,05
Nickel	NiO	0,0013–0,05
Chrom	Cr_2O_3	0,005–0,05
Zink	ZnO	0,003–0,05

Tab. 3-1: Zusammensetzung von Kupolofenschlacken (Bandbreiten)

3.2 Rinnenofenschlacken

Das flüssige Gußeisen wird vom Kupolofen in Induktions-Rinnenöfen geleitet, wo es gespeichert und warmgehalten wird. Hier entsteht, vor allem durch die oxidierende Atmosphäre, noch einmal eine geringe Menge an Rinnenofenschlacken (Elektroofenschlacken, Abfallschlüssel 31218). Die spezifische Menge liegt bei etwa 1,5 bis 5,0 kg Schlacke pro Tonne Gußeisen. Diese geringen Mengen werden diskontinuierlich ausgeschleust und in Wannen geleitet, wo sie erstarren.

Rinnenofenschlacken enthalten in der Regel mehr metallische Bestandteile als Kupolofenschlacken. Dies sind vor allem Eisenoxide, Mangan und Kupfer. Andere Elemente wie Aluminium, Blei, Chrom oder Magnesium sind in geringen Mengen enthalten. Analysen über die Zusammensetzung von Rinnenofenschlacken liegen im allgemeinen nicht vor.

Die technologischen Eigenschaften der Rinnenofenschlacken sind noch nicht untersucht worden. Entsprechende technologische Gutachten zum Einsatz, z. B. im Straßenunterbau sind erforderlich. Die Wiedereinschmelzung der Rinnenofenschlacken in Hochöfen zur Verwertung der metallischen Anteile ist zu prüfen. Die Granulierung der Rinnenofenschlacken zusammen mit den Kupolofenschlacken ist in der Regel durchführbar, wenn die Schlackenrinnen zusammengeschaltet werden.

Die Rinnenofenschlacken sind nicht in der Abfallbestimmungsverordnung (AbfBestV) aufgeführt und demnach nicht besonders überwachungsbedürftig. Die Schlacken werden in der Regel auf Hausmülldeponien entsorgt.

3.3 Gichtgasstäube

Auf dem Weg durch den Ofenschacht werden mit dem Gichtgas Verbrennungsrückstände (Partikel) mitgerissen. Diese Partikel sind Aschen der Koksverbrennung, dem Einsatzmaterial anhaftende Stäube, unverbrannte Zuschlagstoffe wie Kalkstein sowie Metalloxidstäube und andere Verbrennungsrückstände. Beim Einsatz von verzinkten Blechen befinden sich außerdem dampfförmige Zinkbestandteile im Gichtgas. Beim Abkühlen reichert sich in der Abluft ein Staub mit relativ hohem Zinkgehalt an. Die Abluft wird im allgemeinen in Gewebefiltern von den Gichtgasstäuben (Abfallschlüssel 31215) gereinigt. Der Staubgehalt der gereinigten Abluft darf beim Verlassen der Schmelzanlage für Kupolöfen mit Untergichtabsaugung maximal 50 mg/m^3 und bei Öfen mit Obergichtabsaugung maximal 20 mg/m^3 betragen. Das Gichtgas enthält außerdem Schwefel in Staubform und Schwefelverbindungen, die aus dem im Koks gebundenen Schwefel stammen. Diese Schwefelverbindungen verdampfen im Unterofen und kondensieren im Oberofen in reduzierender Atmosphäre.

Die Anfallstellen der Gichtgasstäube sind der Rekuperator, die Brennkammer, der Abgaskühler und die Filtersysteme. Insgesamt entstehen 10 bis 20 kg Gichtgasstaub pro Tonne Gußeisen. Die Zinkgehalte im Staub betragen je nach Anfallstelle 10 bis 30 %. Die Stäube enthalten ebenfalls noch beträchtliche Mengen von Eisenoxid zwischen 8 bis 15 %. Alle Stäube werden von den Anfallstellen über Rohrleitungen in Staubsilos gefördert.

Nach der Abfallbestimmungsverordnung (AbfBestV) sind Gichtgasstäube als besonders überwachungsbedürftige Abfälle (Sonderabfall) zu entsorgen, sofern sie nicht verwertbar sind. Im Regelfall sind die Gichtgasstäube auf Monodeponien oder oberirdischen Sonderabfalldeponien abzulagern. Die Entsorgung auf Hausmülldeponien ist möglich, wenn eine besondere Vorbehandlung erfolgt oder die spezifische Zusammensetzung der Abfälle dies erlaubt. Die Entsorgungskosten betragen derzeit 250 bis 450 DM/t. Zusätzlich ist eine Abfallabgabe nach dem Landesabfallabgabengesetz (LAbfAG) zu entrichten. Im Anhang des Gesetzes werden Gichtgasstäube der Kategorie 1 zugeordnet, womit die Abgabe seit dem 1. 1. 1993 100 DM/t beträgt.

3.4 Ofenausbrüche

In regelmäßigen Zeitabständen müssen die Kupolofen-, Siphon- und die Rinnenofenausmauerungen erneuert werden. Sie sind abgenutzt und ausgebrannt, wodurch sie nicht mehr die optimalen Bedingungen für den Schmelzbetrieb bieten. Die Ofenausbrüche entstehen beim Ausbrechen der Ausmauerungen mit Schlaghämmern, Meißeln und anderen Hilfswerkzeugen. Sie fallen in unregelmäßig großen Bruchstücken bis zur Staubgröße an. Die durchschnittlichen Ausbruchmengen betragen etwa 3 kg Ofenausbruch/t Gußeisen bei modernen Langzeitkupolöfen und bis ca. 15 kg Ofenausbruch/t Gußeisen bei Kaltwind-Kupolöfen. In Kaltwind-Kupolöfen wird die Ofenausmauerung täglich repariert, ausgebessert und neu zugestellt.

Das Ausmauerungsmaterial (Stampfmasse) besteht vor allem aus Siliziumoxid und Aluminiumoxid und geringen Anteilen sonstiger Beimengungen wie Zement, Gießmasse, Korund, Bindemitteln und Härter. Die Stampfmassenbestandteile für eine Kupolofen- und eine Rinnenofenausmauerung zeigt folgende Tabelle.

Bestandteile	**Kupolofen** beispielhafte ∅-Werte in %	**Induktions-Rinnenofen** beispielhafte ∅-Werte in %
Siliziumoxid	90,0	22,0
Aluminiumoxid	8,0	61,0
Titanoxid	0,4	2,6
Eisenoxid	0,5	1,9
Calciumoxid	0,2	0,8
Manganoxid	0,1	–
Natriumoxid	0,1	–
Kaliumoxid	0,5	–
Kohlenstoff	–	11,4

Tab. 3-2: Zusammensetzung der Stampfmassen für die Ofenfutter aus Kupolofen und Induktions-Rinnenofen

Die Standzeit der Stampfmassenausmauerung beträgt ca. 2–12 Wochen bei modernen Langzeitkupolöfen. Die Siphone haben eine Standzeit um 2 Wochen und die Rinnenofenausmauerungen zwischen 3 Monaten und 3 Jahren, abhängig von der Betriebsweise. Kaltwind-Kupolöfen müssen täglich repariert werden.

Der folgende beispielhafte Gesamtaufschluß eines Ofenausbruchs aus einem Langzeitkupolofen ergibt sich bei der Analyse des Ausbruchs mit Königswasser **(Tabelle 3-3).** Eluatanalysen geben Auskunft über das Auswaschverhalten des Ofenausbruchs und werden zur Beurteilung der Deponierbarkeit herangezogen.

Stoffe	Durchschnittswerte %
Unlöslich in Mineralsäure	96,8
Eisenoxid	1,5
Manganoxid	0,3
Calciumoxid	0,6
Bleioxid	0,002
Kupferoxid	0,003
Nickeloxid	0,0007
Chromoxid	0,003
Zinkoxid	< 0,001

Tab. 3-3: Beispielhafte Analyse eines Kupolofenausbruchs mit Königswasser (Gesamtaufschluß)

Ofenausbrüche ohne schädliche Verunreinigungen (Abfallschlüssel 31103) werden auf Hausmülldeponien entsorgt. Ofenausbrüche mit schädlichen Verunreinigungen (Abfallschlüssel 31108) sind nach AbfBestV besonders überwachungsbedürftige Abfälle und im Regelfall auf Sonderabfalldeponien zu entsorgen, sofern sie nicht stofflich verwertet werden können. Die Entsorgung auf Hausmülldeponien ist möglich, wenn eine besondere Vorbehandlung erfolgt oder die spezifische Zusammensetzung der Abfälle dies erlaubt.

Die Deponiekosten für Sonderabfalldeponien liegen derzeit zwischen 400 bis 500 DM/t. Hinzu kommt (für Abfallschlüssel 31108) die Abfallabgabe nach dem Landesabfallabgabengesetz (LAbfAG). Im Anhang des Gesetzes werden seit dem 1.1. Ofenausbrüche der Kategorie 2 zugeordnet, womit die Abgabe 1993 200 DM/t beträgt.

3.5 Koksgrus bzw. Koksabrieb

Koksgrus sind Koksteilchen mit Korngrößen kleiner 6 mm. Beim Transport von Koks aus den Silos über die Förderbänder wird der Feinkornanteil bzw. das Unterkorn abgesiebt und fällt dabei als Koksgrus (Koksstaub) in sehr reiner Form an. Beim Befüllen der Chargierkübel sowie beim Abwerfen der Chargen in den Trichter in den Kupolofenkopf entstehen ebenfalls Koksabriebstäube bzw. Koksgrus. Diese sind vermischt mit den von den Einsatzstoffen sich ablösenden Verschmutzungen und den Stäuben der Schlackenbildner. Über der Ofenkopfabsaugung, an den Förderbandhäusern und der Gattierung wird die Abluft abgesaugt. In den nachgeschalteten Gewebefiltern wird der Koksgruß abgefiltert und die gereinigte Luft gelangt in die Atmosphäre. Insgesamt fallen spezifische Koksgrusmengen von 1 bis 3 kg/t Grauguß an. Der Koksgrus setzt sich durchschnittlich wie folgt zusammen.

Stoffart	%-Anteil
Kohlenstoff	85,00
Schwefel	0,70
Magnesium	0,16
Eisen	0,68
Calcium	2,94
Blei	0,01
Sonstige	11,51

Tab. 3-4: Beispielhafte Zusammensetzung von Koksgrus

Diese Abfallart besitzt einen sehr hohen Kohlenstoffgehalt und deshalb einen beträchtlichen noch nutzbaren Heizwert. Die energetische Verwertung der im Koksgruß enthaltenen Energie liegt nahe. Die Nutzung erfolgt durch Wiedereindüsung des Koksgruses in den Kupolofen oder durch den Einsatz als Zusatzbrennstoff in anderen energieerzeugenden Anlagen. Nur wenige Kupolofenanlagen sind jedoch mit der erforderlichen Eindüsungstechnik versehen.

Die Koksgruse werden unter der Abfallschlüsselnummer 31301 in den meisten Fällen zusammen mit den sonstigen Stäuben über die Hausmülldeponie entsorgt, soweit sie nicht verwertet werden können.

3.6 Sonstige Stäube oder Filterstäube

Über den Gattierungsstellen, den Förderbändern für die Einsatzsstoffe, den Rinnenöfen sowie den Abführrinnen für das Schmelzgut als auch der Schlacken wird die staubhaltige Abluft abgesaugt und zentralen Filteranlagen zugeführt, in denen die sonstigen Stäube oder Filterstäu-

be (Abfallschlüssel 31301) anfallen. Sie bestehen aus Gemischen von Aschen, Metalloxiden, unverbrannten Sandanhängen, Koksabrieb und anderen Bestandteilen. Die spezifischen Mengen können nur grob abgeschätzt werden und liegen nach Aussagen von Betreibern durchschnittlich zwischen 1 bis 5 kg/t Schmelzgut.

Die Filterstäube werden oft noch befeuchtet und anschließend in der Regel auf Hausmülldeponien abgelagert.

4 Vermeidung und Verwertung von Abfällen/ Reststoffen aus Kupolofen-Schmelzanlagen

Die Maßnahmen zur **Vermeidung** von Abfällen/Reststoffen in Kupolöfen sind vielfältig und ihre wechselseitigen Beeinflussungen sind äußerst komplex. Deshalb läßt sich die Vermeidung nur aus der Kenntnis der verfahrenstechnischen Modifikationen und den daraus abgeleiteten Kupolofenvarianten verstehen. So verringern sich praktisch alle Reststoffe mit der Senkung der Koksmengen durch Maßnahmen wie

- Windvorwärmung,
- Sauerstoffeindüsung,
- Sekundärluftbetrieb,

- Kokssubstitution,
- futterlose Ofenbauweise und
- Optimierung des Ofenbetriebes,

wodurch insgesamt Vermeidungspotentiale zwischen 20 und 60 % in Abhängigkeit der eingesetzten Kupolofenvariante erreichbar sind.

Deshalb werden nachfolgend zuerst die wichtigsten verfahrenstechnischen Modifikationen und die daraus entwickelten Kupolofenvarianten zur Vermeidung von Reststoffen in den Kapiteln 4.1 und 4.2 dargestellt.

Die nicht vermeidbaren Reststoffe sind nach **Aufbereitung** durch Granulierung oder Zerkleinerung der Schlacken, Aufkonzentration von zinkhaltigen Gichtgasstäuben durch Wiedereindüsung oder Verbrennung von Koksgrus weitgehend verwertbar.

Für die **Verwertung** der Reststoffe werden die möglichen Maßnahmen zu jeder Abfallart in Kapitel 4.3 geschildert.

4.1 Vermeidung von Reststoffen durch Änderung der Verfahrensparameter in den Kupolöfen

Die Reststoffvermeidung war bisher nicht das vorrangige Ziel von Verfahrensverbesserungen in Kupolofen-Schmelzanlagen, sondern die Senkung des Energieverbrauchs, die verbesserte Nutzung der Einsatz- und Hilfsstoffe sowie die Verringerung der Emissionen.

Durch verschiedene verfahrenstechnische Maßnahmen konnte der Einsatz von Koks in den letzten Jahren ständig verringert werden. Vor allem die Verringerung des Kokseinsatzes bei verbesserter Ofenleistung sowie Langzeitausmauerungen brachten zum Teil eine drastische Verminderung von Schlacken, Stäuben, Koksgrus und Ofenausbrüchen mit sich. Die Entwicklung ist nicht abgeschlossen.

Die wichtigsten verfahrenstechnischen Prinzipien (Modifikationen) zur Einflußnahme auf eine wirtschaftlichere Betriebsweise und somit auch zur Vermeidung von Reststoffen zeigt die folgende Tabelle:

Verfahrensmodifikationen	Verfahrenstechnische Umsetzung, Ziel	Anwendung/Aggregat	Auswirkungen auf Reststoffe
Keine	– ohne zusätzlichen Verfahrensparameter	Kaltwind-Kupolofen (Basissystem)	Keine
Windvorwärmung	– Rekuperator, gichtgasbeheizt	Heißwind-Kupolofen	**Für alle Modifikationen wird Energie eingespart bzw. die Kokszusatzmenge verringert, was sich auf die Verringerung aller Reststoffe auswirkt**
Sauerstoffzusatz	– Anreicherung im Windkanal – Direkteindüsung in die Winddüsen	Kupolofen mit sauerstoffangereichertem Wind oder Sauerstoffdirekteindüsung	
Zweite Düsenreihen	– Sekundärluft für CO-Nachverbrennung – Zweite obere Düsenreihe mit zweiter Nachverbrennungszone und CO-Nachverbrennung – Zusatzfeuerung durch die zweite Düsenreihe	Kupolofen mit Sekundärwind oder Sekundärfeuerung	
Kokssubstitution durch Öl- oder Erdgaszusatz	– Öl- oder gasbeheizt mit Kugeln als Stützbett	Koksloser Kupolofen oder	
	– gasbeheizt, Koks aber nur als Stützbett und Aufkohlungsstrecke	Gasbefeuerter Koks-Kupolofen	
Ausmauerung und Siphone	– nur im Ofenboden ausgemauert, Ofenmantel wird wassergekühlt – mehrere Siphone, was kontinuierliche Abnahme ermöglicht – Standzeiterhöhung auf mehr als 2–3 Wochen (ansonsten muß die Ausmauerung täglich repariert werden)	Futterloser Heißwind-Kupolofen und Futterloser Langzeit-Heißwind-Kupolofen	
Koksgrößen optimieren	– Verbesserung der Wärmeabgabe	In allen koksbefeuerten Kupolöfen anwendbar	

Tab. 4-1: Übersicht der möglichen Verfahrensmodifikationen zur Verringerung der Reststoffmengen in Kupolöfen

Mit der Einführung der Verfahrensmodifikationen ergeben sich die verschiedenen Kupolofenvarianten, die in Kapitel 4.2 beschrieben werden.

4.2 Kupolofenvarianten zur Vermeidung von Reststoffen

In diesem Abschnitt werden die Kupolofenvarianten erläutert. Die verschiedenen Varianten entwickeln sich aus den angewendeten Verfahrensmodifikationen.

In der folgenden Tabelle sind die verschiedenen Kupolofenvarianten mit ihren wichtigsten Kenndaten sowie die Beurteilung nach der technischen Durchführbarkeit aufgeführt. Die Vermeidungsquoten werden, vom Kaltwind-Kupolofen (Basissystem) ausgehend, abgeschätzt.

Deshalb bietet sich zur Beurteilung der Vermeidung die Aufteilung der Kupolöfen in die folgenden Gruppen an. Die Reihenfolge gibt den Rang wieder, den die verschiedenen Verfahrensvarianten bezüglich der Vermeidung von Reststoffen einnehmen:

Rangfolge der Kupolofenvarianten bezüglich der Vermeidungspotentiale
Gruppe a) Kaltwindeindüsung ohne zusätzliche Verfahrensparameter 1. Kaltwind-Kupolofen (Basissystem) Größte Reststoffmengen, da keine Vermeidung möglich ist.
Gruppe b) Zusätzliche Verfahrensparameter, Anwendung bei allen Kupolöfen 2. Kupolofen mit Sekundärwind 3. Kupolofen mit sauerstoffangereichertem Wind oder Sauerstoffdirekteindüsung Vermeidung der Reststoffmengen um durchschnittlich 20 bis 30 %
Gruppe c) Heißwindeindüsung mit zusätzlichen Verfahrensparametern 4. Heißwind-Kupolofen 5a. Futterloser, wassergekühlter Heißwind-Kupolofen 5b. Futterloser, wassergekühlter Langzeit-Heißwind-Kupolofen (Ofen 5a und 5b unterscheiden sich nur geringfügig) Vermeidung der Reststoffmengen um durchschnittlich 30 bis 40 %
Gruppe d) Neuere Verfahren (in Entwicklung) 6. Koksloser Kupolofen 7. Gasgefeuerter koksgestützer Kupolofen Vermeidung der Reststoffmengen um durchschnittlich 40 bis 50 %

Tab. 4-2: Übersicht der Rangfolge der Vermeidungspotentiale bei den verschiedenen Kupolofenvarianten, geordnet nach Gruppen (Die Vermeidungsabschätzungen beziehen sich jeweils auf das Basissystem)

Die Abschätzung der Vermeidungsquoten ist außerordentlich schwierig, da die Wechselwirkungen der verschiedenen Verfahrensparameter die Bewertung erschweren. Außerdem beeinflussen Betriebsdaten wie das Alter der Anlage, Fahrweise (Anzahl der Betriebsstunden pro Tag), die zu erschmelzende Gußart (erforderliche Schmelztemperatur) sowie die Qualifikation des Betriebspersonals die Reststoffentstehung bzw. die anfallenden Mengen.

Bei der Abschätzung der Vermeidungsquoten wird davon ausgegangen, daß sich mit der steigenden Reihenfolge alle vorab beschriebenen Verfahrensparameter weitgehend verwirklichen lassen, z. B. kommt beim Heißwind-Kupolofen (4) die Sauerstoffeindüsung (3) und oder Sekundärwind (2) mit zum Einsatz.

Kupolofenvarianten	Kurzbeschreibung – Verfahrensmodifikationen und Auswirkungen –	Technische Durchführbarkeit/ Bewertung/Anmerkungen	Vermeidungs-potentiale in %	Was wird vermieden
GRUPPE a)	**Kaltwindeindüsung ohne zusätzliche Verfahrensmodifikationen**			
Kaltwind-Kupolofen (BASISVARIANTE) 1)	– Einblasen von Kaltwind – Einsatzbereich bis 10 t/h – Schmelztemperatur <1 530 °C – nicht geeignet für GGG	ohne zusätzliche Verfahrensparameter, **veraltete Technologie,** Basisvariante ist aber noch häufig im Einsatz in kleinen und mittleren Gießereien	0 (als Bezugs-größe)	Annahme: ohne Reststoff-vermeidung
GRUPPE b)	**Zusätzlich anwendbare Verfahrensmodifikationen für alle Kupolöfen**			
Kupolofen mit Sekundärwind 2)	– In einer zweiten Düsen-ebene wird Kohlenmonoxid beim Einblasen von Sekun-därwind nachverbrannt – Kokssatzsenkung um 20–40 % ist dadurch möglich – ohne Windvorwärmung – Einsatz vor allem bei Kaltwind-Kupolofen – Kaltwindöfen können so die Energien nach Umrüstung besser nutzen – Auch Heißwindöfen wurden bereits mit Erfolg umge-rüstet	**Stand der Technik:** Wird eingesetzt, wenn die Investitionskosten für einen Langzeitofen nicht wirtschaftlich sind, was von der Art und Menge des zu erschmelzenden Flüssigeisens abhängt.	20–40	Verringerung vor allem von: – Stäuben – Koksgrus aber auch: – Schlacke
Kupolofen mit Sauerstoffdirekt-eindüsung 3)	– Die zusätzliche Eindüsung von technischem Sauerstoff ist prinzipiell bei allen Ofenvarianten möglich – Die Schmelzleistung kann um 10-15 % erhöht werden – Steigerung der Eisentem-peratur und Senkung des Kokssatzes – Verringerung der Schlacken und Staubmengen	**Stand der Technik:** In jedem Einzelfall muß der Investitionsaufwand für die Sauerstoffein-düsung mit der Einspa-rung von Energie abge-wogen werden.	20–30	geringfügig weitere Verringerung von – Schlacken – Koksgrus – Stäuben
GRUPPE c)	**Heißwindeindüsung mit zusätzlichen Verfahrensmodifikationen**			
Heißwind-Kupolofen 4)	– Niedrigerer Kokssatz – Windvorwärmung durch Rekuperator – Schmelztemperatur über 1 500 °C – Geringere Reststoffmengen – Einsatz von Stahlschrott – Einsatzbereich < 10 t/h	**Stand der Technik:** Häufig eingesetzte Kupolofenvariante, Wirtschaftlichkeit und Ofenwirkungsgrad-steigerung gegenüber Basisvariante	30–40	– Schlacke – Koksgrus – Stäube – Ofenaus-bruch
Futterloser wassergekühlter Heißwind-Kupolofen 5a)	– Prinzipiell wie 4) und: – Ofenschacht ist nicht ausgemauert – Nur die untere Ofensohle hat eine feuerfeste Ausmauerung – Ofenwandkühlung durch Berieselung der Außenwand – Kontinuierliche Betriebsweise bei 2–3-Schichtbetrieb über mehrere Wochen möglich – Einsatz bei Serienproduktion in großen Gießereien – Durchsatz mehr als 10 t/h	**Stand der Technik:** Dieser Ofentyp ist wirtschaftlich nur beim Erschmelzen großer Eisen-mengen.	30–40	vor allem – Ofenaus-bruch aber auch Vermind-erung von – Schlacken – Stäuben

Tab. 4-3/1: Kurzbeschreibung der Verfahrensmodifikationen, deren Auswirkungen, Bewertung, Vermeidungspotentiale und Reststoffanfall in den verschiedenen Kupolofenvarianten

Kupolofenvarianten	Kurzbeschreibung – Verfahrensmodifikationen und Auswirkungen –	Technische Durchführbarkeit/ Bewertung/Anmerkungen	Vermeidungs-potentiale in %	Was wird vermieden
GRUPPE c)	**Heißwindeindüsung mit zusätzlichen Verfahrensmodifikationen**			
Futterloser wassergekühlter Langzeit-Heißwind-Kupolofen 5b)	– Prinzipiell wie 5a) und: – Mindestens 2 Schlacken-abscheidersysteme (Siphone), die unter Druck betrieben werden – Kontinuierliche Eisen- und Schlackenabnahme – Kontinuierliche Schlacken-granulierung möglich – Reparatur und Wartung der Siphone im Betriebszustand – Schlackearme Betriebsweise – Erzeugung verschiedener Eisensorten mit nur geringen Mengen an Übergangseisen möglich – Schwankungsfreie Eisen-zusammensetzung und Eisen-temperatur über lange Schmelzperioden – Insgesamt relativ geringe spez. Reststoffmengen	**Stand der Technik:** Dieser Ofentyp ist die derzeit modernste großtechnisch eingesetzte Kupolofenvariante. Er ist wirtschaftlich und energiearm zu betreiben, auch dann, wenn unterschiedliche Eisenzusammensetzung gefordert ist.	30–40	Prinzipiell dieselben Reststoffe wie bei 5a)
GRUPPE d)	**Neue kokslose/koksarme Kupolofenverfahren in der Entwicklung**			
Koksloser Kupolofen 6)	– Anstelle der Beschickungs- und Stützsäule aus Koks werden hier Kugeln auf Roststäben benutzt – Öl und Gas als Energie-träger – Kugelverbrauch 30–50 kg/t Schmelzgut – Nur Abstichtemperaturen zwischen 1 400–1 460 °C sind erreichbar – Nachbehandlung in Induk-tions-Tiegelöfen ist meist erforderlich (Duplexbetrieb) – Der Kreislaufmaterial-anteil darf nicht über 50 % liegen	**Stand der Wissenschaft und Technik:** Noch nicht voll ausge-reift im großtechni-schen Maßstab einge-setzt. Sehr umweltfreundliches und reststoffarmes Verfahren.	40–50	– Kein Koksgrus – sehr geringe Staub-mengen – Ofenausbruch wie bei 4) 5a) 5b) – Stütz-kugeln gehen in die Schlacke ein
Gasgefeuerter koksgestützter Kupolofen 7)	– Prinzipiell wie koksloser Kupolofen – Jedoch mit Koks vorwiegend als Stützbett – Koks liefert geringen Brennstoffanteil – Koks dient der Aufkohlung des Flüssigeisens	**Stand der Wissenschaft und Technik** In der Praxis noch nicht erprobt. Keine Aussagen über technische Durchführ-barkeit und Wirtschaft-lichkeit möglich. Kann sich als sehr um-weltfreundliches abfall-armes Verfahren ent-wickeln	40–50	– Mengen wie bei 6) – keine Kugeln

Tab. 4-3/2: Kurzbeschreibung der Verfahrensmodifikationen, deren Auswirkungen, Bewertung, Vermeidungspotentiale und Reststoffanfall in den verschiedenen Kupolofenvarianten

4.2.1 Kaltwind-Kupolofen – Basissystem – (1)

Dieser Ofentyp ohne zusätzliche Verfahrensmodifikationen wird als Basisvariante zur Bewertung der verschiedenen Kupolofenvarianten herangezogen. Mit dem Kaltwind-Kupolofen wird also keine Vermeidung erreicht.

Kaltwind-Kupolöfen werden ausschließlich im Wechsel betrieben. Während der eine Kupolofen Flüssigeisen erschmelzt, wird der andere Ofen gewartet oder die Ausmauerung erneuert. Die Schmelzleistungen liegen im Bereich bis etwa 10 t/h. Die Kaltwind-Kupolöfen haben im allgemeinen eine Obergichtabsaugung, bei der eine Nutzung des Gichtgases zumeist unwirtschaftlich ist.

Hohe Temperaturen müssen energieaufwendig durch überhöhten Kokssatz eingestellt werden, womit zwangsläufig eine Reihe von Nachteilen verbunden sind. Damit in Zusammenhang steht die Zunahme des CO-Gehaltes und der Gichtgastemperatur. Durch den hohen spezifischen Kokszusatz sind im wesentlichen auch die großen Mengen an entstehenden Reststoffen zu erklären.

Der Staubauswurf (Gichtgasstäube, sonstige Stäube und Koksstäube) ist hoch und beträgt etwa 15 bis 35 kg/t Flüssigeisen. Der Schlackenanfall liegt bei 60 bis 120 kg/t Flüssigeisen. An Ofenausbruchmengen sind durchschnittlich 3 bis 15 kg/t Flüssigeisen zu entsorgen.

Die konventionelle Form des Kaltwind-Kupolofens ohne zusätzliche Verfahrensmodifikationen entspricht nicht mehr den heutigen Ansprüchen, wie sie an ein Schmelzaggregat in den Gießereien gestellt werden. Dieser Basisofen entspricht nicht mehr dem Stand der Technik. Deshalb werden in vielen Fällen Aufrüstungen vorgenommen wie Sekundärwind, Sauerstoffeindüsung oder Gas-Öl-Zusatzbrenner.

4.2.2 Kupolofen mit Sekundärwind (2)

Die Eindüsung in einer zweiten Eindüsungsreihe (Sekundäreindüsung) über der normalen Düsenreihe (Primäreindüsung) gibt dem Kupolofen mit Sekundärwind seinen Namen. Das oberhalb der heißesten Ofenzone entstehende Kohlenmonoxid (CO) wird durch gesteuertes Einblasen von Sekundärwind in einer zweiten Düsenreihe oberhalb der Primäreindüsung nachverbrannt. Hierzu ist der Kupolofen mit einem zweiten Windzuführungsystem ausgerüstet **(Abb. 4-1).**

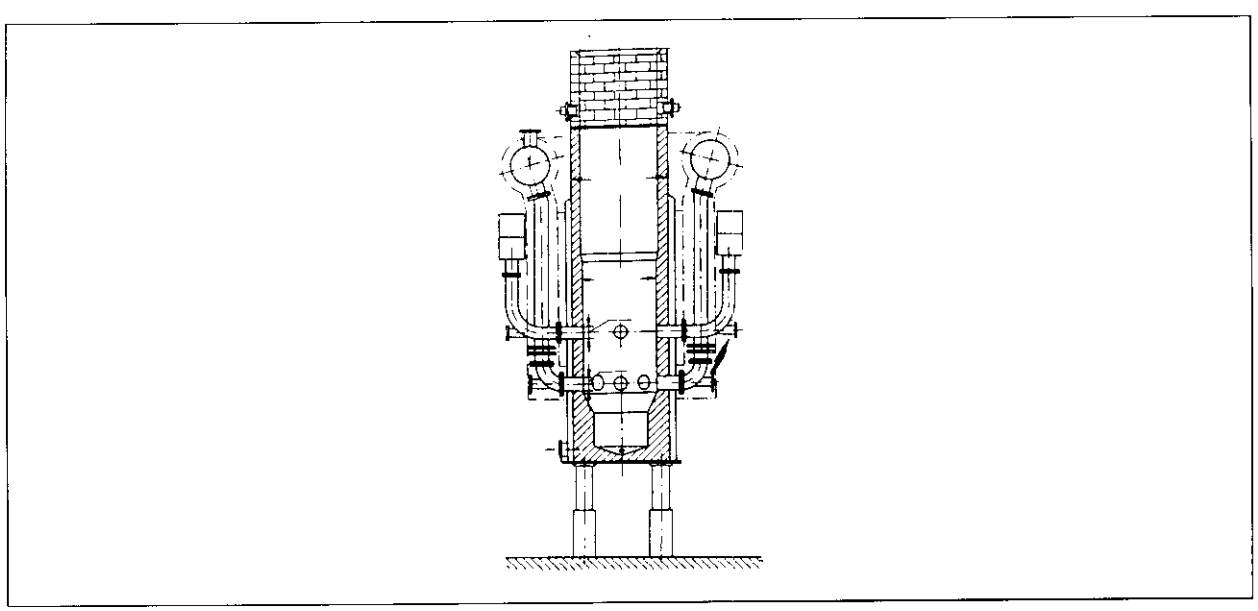


Abb. 4-1: Kupolofen mit Sekundäreindüsung (Quelle: Baake, Bordes, Gysbert)

Durch die Nachverbrennung des CO in der Beschickungssäule wird Wärme frei, die größtenteils direkt von dem Gattierungsmaterial aufgenommen wird. Auf diese Weise läßt sich die Brennstoffausnutzung verbessern und der Kokssatz um etwa 20 bis 40 % senken. Demzufolge werden Reststoffe vermindert und die Schmelzleistung wird erhöht.

Folgende spezifische Verfahrensparameter charakterisieren den Sekundärbetrieb:

- Mit den 10 bis 20 % CO-Anteil im Gichtgas werden 35 bis 45 % der verfügbaren Wärme aus dem Kupolofen ausgetragen
- Durch Einblasen von Sekundärluft in der optimalen Ebene wird das CO oberhalb der Schmelzzone nachverbrannt
- Es darf keine zweite Schmelzzone entstehen, weil dies eine CO_2-Reduktion nach sich ziehen würde
- Die Schachthöhe oberhalb der Nachverbrennungszone muß hoch genug sein, um die zurückgewonnene Wärme auf den Einsatz zu übertragen

In der Praxis wird das Verfahren vornehmlich für den Kaltwindbetrieb eingesetzt mit dem Ziel einer besseren Überhitzung des Eisens und vor allem einer Koksersparnis, die – auf gleiche Eisentemperatur bezogen – bei durchschnittlich 30 % liegt. Entsprechend wird der Eisendurchsatz um etwa 20 % erhöht **(Abb. 4-2).**

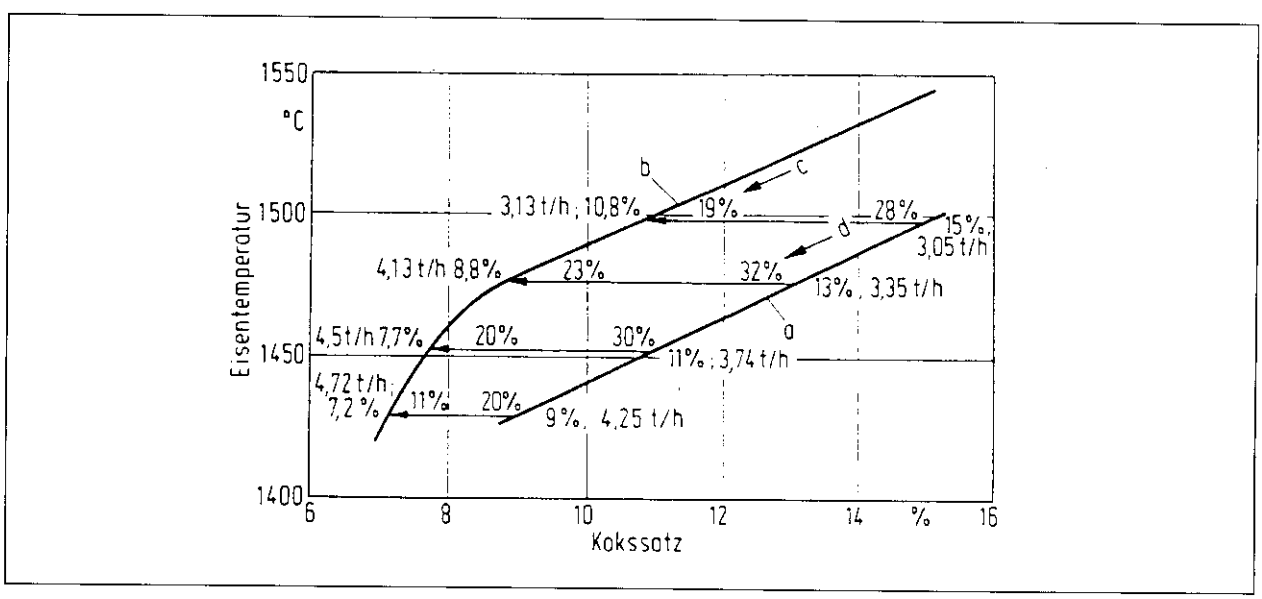


Abb. 4-2: Anstieg der Abstichtemperatur bzw. Ersparnis an Koks beim Betrieb mit Sekundärluft
a) eine Düsenreihe, b) zwei Düsenreihen mit günstigstem Abstand, c) Anstieg der Schmelzleistung, d) Verminderung des Koksverbrauchs (Q: Neumann)

Der Umbau eines Kaltwindofens auf Sekundärbetrieb ist in fast allen Fällen möglich, wenn die Schachthöhe so hoch ist, daß die zweite Düsenreihe im nachhinein einbaubar ist. Die Verbesserungen lassen sich durch relativ einfache Umbaumaßnahmen vornehmen, so daß zahlreiche Kaltwind-Kupolöfen auf Sekundärluftbetrieb umgestellt wurden.

Heißwindöfen wurden dagegen nur in Einzelfällen umgerüstet, weil der Erfolg bedeutend geringer ist. Im allgemeinen erfolgt die CO_2-Nutzung bereits im Sekundärring. Die Umstellung ist nur dann sinnvoll, wenn sowohl der Primär- als auch der Sekundärwind kalt eingedüst werden.

Der Staubauswurf verringert sich durch die Verminderung der eingesetzten Koksmenge. Die Schlackenmengen sowie die Ofenausbrüche verringern sich ebenfalls geringfügig. Angaben über die Verminderungsraten liegen nicht vor. Insgesamt kann eine Vermeidungsquote aller Reststoffe von 20 bis 30 %, bezogen auf den Basis-Kaltwind-Kupolofen angenommen werden. Diese Quoten sind mit großen Unsicherheiten behaftet, weil sich je nach Kombination einzelner Verfahrensparameter in einem Kupolofen unter Berücksichtigung der spezifischen betrieblichen Randbedingungen eine große Anzahl von sich wechselseitig beeinflussenden Faktoren ergeben, welche die Reststoffentstehung bestimmen.

Der Kaltwind-Kupolofen mit Sekundärwind entspricht dem Stand der Technik.

4.2.3 Kupolofen mit sauerstoffangereichertem Wind oder Sauerstoffdirekteindüsung (3)

Bei diesen Verfahren wird der Sauerstoff in die Windleitung zwischen Gebläse und Windring eingedüst. Die Dosierung der Sauerstoffzugaben erfolgt mit voreingestellten Düsen. Durch Sauerstoffanreicherung wird eine intensivere Verbrennung des Kohlenstoffs bewirkt. Es tritt eine höhere Verbrennungstemperatur ein. Damit ist die Verbesserung der Schmelzleistung um 10 bis 15 % durch Sauerstoffzugabe möglich.

Eine weitere Steigerung der Eisentemperatur läßt sich erreichen, wenn der Sauerstoff mit einer Lanze direkt in das Koksbett eingeblasen wird. Dieses Verfahren findet bevorzugt Anwendung, weil der Sauerstoffverbrauch dadurch geringer ist.

Dieses Verfahren hat sich zur Regulierung und Verbesserung sowohl der Überhitzung als auch der Schmelzleistung vor allem beim Kaltwindofen bewährt. Auch beim Anfahren des Kupolofens läßt sich durch Sauerstoffeindüsung die Eisentemperatur beschleunigt erhöhen. Das Verfahren ist ebenso bei Kupolofen mit Sekundärwind anwendbar.

Der O_2-Anreicherungsanteil liegt stets unter 5 %, da bei höheren O_2-Anteilen örtlich Überhitzungen des Flüssigeisens auftreten. In vielen Fällen ist das Ziel der Sauerstoffeindüsung die Steigerung der Eisentemperatur (Überhitzung). Wird Sauerstoff eingedüst, ist eine Senkung des Kokseinsatzes möglich **(Abb. 4-3).**

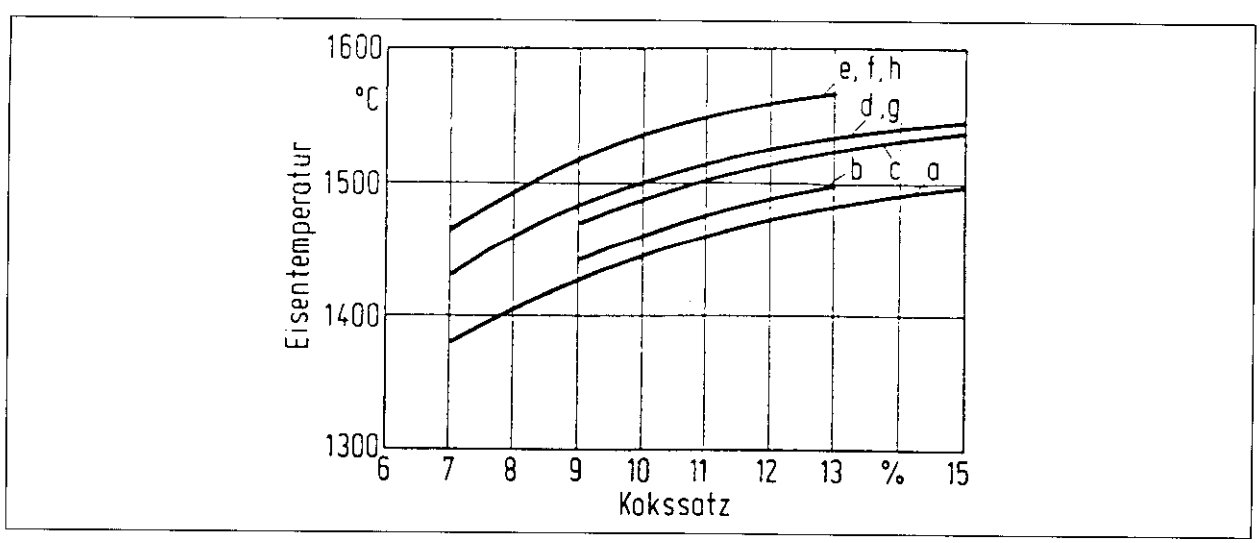


Abb. 4-3: Einfluß verschiedener Arten einer Sauerstoffzugabe zum Kupolofen sowie des Arbeitens mit Sekundärwind ohne und mit Sauerstoffzusatz in der unteren Düsenebene auf die Eisentemperatur

a) ohne Sauerstoff (O_2), b) O_2-Anreicherung im Wind, c) O_2-Injektion in Düsen, d) O_2-Injektion 230 mm unter Düsen, e) O_2-Injektion 610 mm unter Düsen, f) O_2-Injektion 910 mm unter Düsen, g) Schmelzen mit Sekundärluft ohne Sauerstoff, h) Schmelzen mit Sekundärluft und O_2-Anreicherung in unteren Düsen (Q.: Neumann; Selby)

Durch Sauerstoffeindüsung läßt sich der Reststoffanfall weiter senken. Durch die Verringerung vor allem von Kokseinsatz ist die anfallende Staubmenge geringer. Über die Größenordnungen zur Vermeidung liegen keine Angaben vor.

Insgesamt kann eine Vermeidungsquote aller Reststoffe von 20 bis 30 %, bezogen auf den Basis-Kaltwind-Kupolofen, angenommen werden. Diese Quoten sind ebenfalls mit großen Unsicherheiten behaftet, weil je nach Kombination einzelner Verfahrensparameter in einem Kupolofen sowie der spezifischen betrieblichen Randbedingungen eine große Anzahl von sich wechselseitig beeinflussenden Faktoren die Reststoffentstehung bestimmen.

Auch dieses Verfahren ist großtechnisch im Einsatz und somit ein Verfahren nach dem Stand der Technik. Gesamtbilanziell ist zu berücksichtigen, daß die Sauerstofferzeugung selbst Energie erfordert.

4.2.4 Konventioneller Heißwind-Kupolofen (4)

Für Schmelzleistungen über 10 t/h bis 70 t/h kommen Heißwind-Kupolöfen zum Einsatz. Die Windvorwärmung hat den Begriff des sogenannten „Heißwind-Kupolofens" geprägt. Die Vorteile sind im wesentlichen eine Erhöhung der Verbrennungstemperatur bei gleichem Kokssatz sowie die Temperatursteigerung des Flüssigeisens.

Von Nachteil ist bei diesem konventionellen Heißwindofen, daß sein Futter praktisch täglich ausgebessert oder erneuert werden muß. Deshalb wird er fast ausschließlich im Wechsel betrieben, wobei immer ein Ofen zur Wartung stillsteht. Dieser Nachteil wird bei den futterlosen Varianten vermieden.

Durch das höhere Temperaturniveau wird der Wärmeübergang insbesondere im Überhitzungsbereich intensiver. Eisen und Schlacke werden heißer und reagieren demzufolge besser aus. Die Wärmeübertragung vom Ofengas auf das herabtropfende Eisen ist besser als beim Kaltwindofen. Im Mittel ist je nach den Betriebsbedingungen eine Eisentemperatursteigerung von 15–25 °C bei Steigerung der Windvorwärmungstemperatur um 100 °C zu erreichen. Für den Überhitzungsbereich wird hierbei auch eine Verbesserung der Koksenergienutzung erzielt.

Die Schmelzleistungssteigerung bei Windvorwärmung hat zwei Gründe: zum einen wird bei einem Heißwindofen mit geringerem Kokssatz gefahren; zum anderen addiert sich die Auswirkung der intensiveren CO-Verbrennung in der Nutzung der Verbrennungsenergie durch Aufwärmen und Einblasen des ca. 500 °C warmen Heißwindes in die Schmelzzone.

Der Heißwindbetrieb bringt auch Vorteile in bezug auf die metallurgischen Wechselwirkungen. Der Abbrand wird vermindert und die Aufkohlung erhöht. Die Schlacke wird insgesamt besser ausreduziert.

Insgesamt vermindert sich der Schlacken-, Staub- und Koksgrusanfall um etwa 20 bis 30 % im Vergleich zum Kaltwind-Kupolofen. Die durchsschnittlichen Reststoffmengen, bezogen auf 1 t Flüssigeisen, betragen: 50 bis 60 kg Schlacken, 10 bis 30 kg Gichtgas-, Koksgrus- und sonstige Stäube, 3 bis 10 kg Ofenausbrüche.

Der Heißwindofen mit seinen Verfahrensmodifikationen hat derzeit noch eine große Bedeutung als zuverlässiges und wirtschaftliches Schmelzaggregat in Gießereien. Dieser Schmelzofen entspricht dem Stand der Technik.

4.2.5 Futterloser, wassergekühlter Heißwind-Kupolofen (5a)

Zur Verbesserung der Betriebseigenschaften und der Ofenstandzeit, Verminderung der Futterreparaturen und Einsparung der Stampfmassen werden Heißwind-Kupolöfen auch ohne feuerfeste Auskleidung des Ofenschachtes ausgeführt **(Abb. 4-4).** Damit werden die Nachteile des konventionellen Heißwind-Kupolofens vermieden, wo die tägliche Reparatur der Ausmauerungen erforderlich ist.

Der Schachtraum ist mit einem Schlagpanzer von innen ausgestattet, der gegen das in den Ofen eingeworfene Material besonders beständig ist. Lediglich der Herd und die Ofensohle sind ausgekleidet. Der futterlose Schacht wird von außen mit Wasser gekühlt. Die Düsen werden ebenfalls mit einem eigenen Kühlwasserkreislauf versehen. Die Wasserkühlungen erfordern einen Mehrverbrauch an Koks zwischen 2 und 4 %. Dieser Mehrverbrauch wird im allgemeinen ausgeglichen durch die Verminderung der energieintensiven Ab- und Anfahrzyklen des Ofens zur Reparatur der Ausmauerung.

Im unteren Teil des Ofenschachts, d. h. im Bereich der flüssigen Schlacke, bildet der Ofen sein Futter zum Teil mit der Schlacke selbst, die sich an den Ofenwänden absetzt. Die Schlakkenzusammensetzung läßt sich relativ leicht steuern, da der beim sauren Ofen stark schwankende und schlecht kontrollierbare Futterausbrand beim futterlosen Ofen entfällt. Der Ofen ist zur Eisen- und Schlackenentnahme mit einem außenliegenden Drucksiphon ausgestattet, der ebenfalls eine höhere Standzeit besitzt als innenliegende drucklose Siphone.

Der Hauptvorteil des futterlosen Ofens liegt in der kontinuierlichen Betriebsweise, so daß bei 2- bis 3schichtigem Betrieb der Ofen über etwa 2 Wochen hinweg durchgefahren werden kann.

Von Nachteil ist, daß abwechselndes Erschmelzen verschiedener Eisensorten nicht im kontinuierlichen Betrieb möglich ist. Beim Wechsel muß ein Übergangseisen erschmolzen werden. Deshalb liegt das vorwiegende Einsatzgebiet der futterlosen Kupolöfen in größeren Gießereien mit Serienproduktion derselben Gußsorten, die im Mehrschichtbetrieb arbeiten.

Die Vermeidungsquote liegt zwischen 30 bis 40 %, bezogen auf den Kaltwind-Kupolofen.

Durch den geringeren Abbrand von Ofenfutter entstehen weniger Schlacke und geringere Mengen an Stäuben. Außerdem muß weniger Ofenausbruch entsorgt werden, da der Ofen seltener ausgebrochen wird. Ofenausbrüche fallen nur im unteren Herdbereich an. Durch den Mehreinsatz von etwa 2 bis 4 % an Koks als Brennstoff, wird andererseits zusätzlich Asche in die Schlacke eingebunden. Es entstehen geringe zusätzliche Mengen an Schlacken und Gichtgasstaub. Die spezifischen Reststoffmengen für Schlacken und Stäube liegen geringfügig unterhalb der oben angegebenen Mengen für den Heißwind-Kupolofen. Die zu entsorgenden Ofenausbruchmengen sind entschieden geringer und betragen durchschnittlich 3 bis 8 kg/t Flüssigeisen.

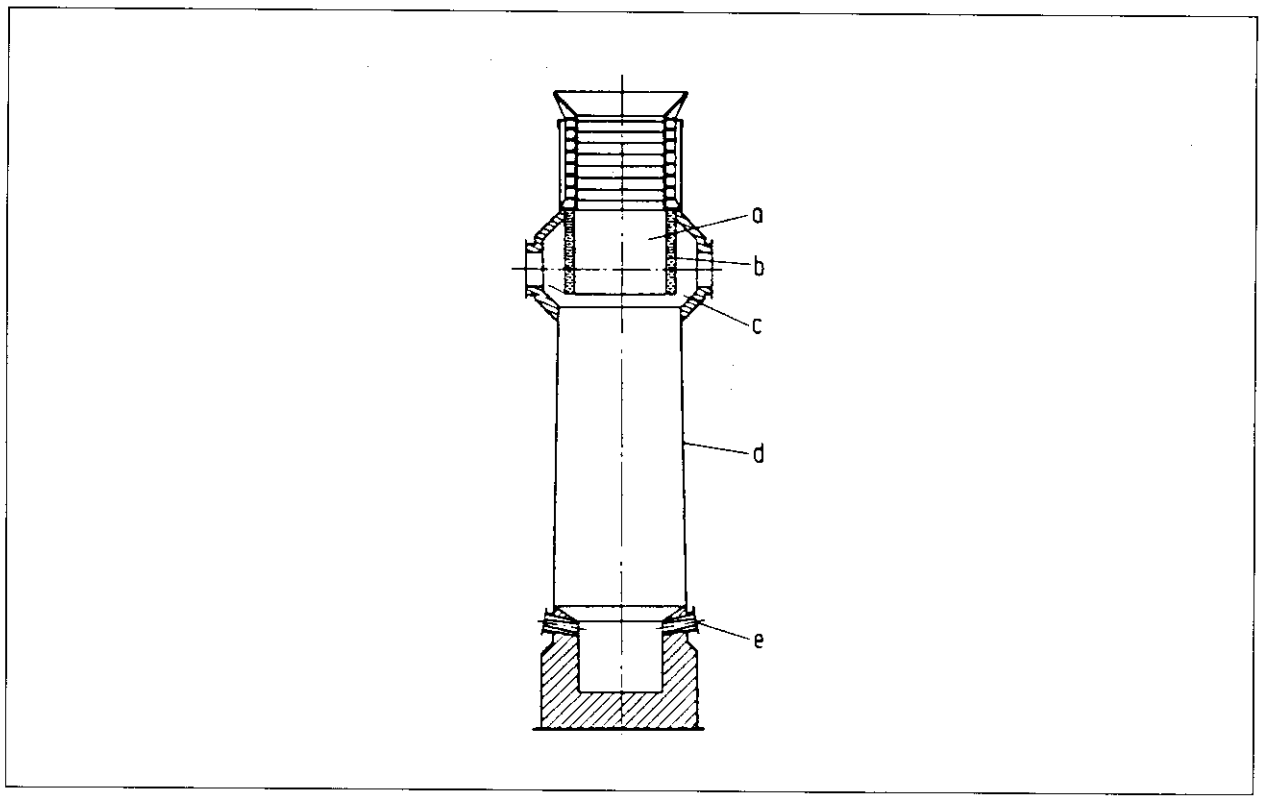


Abb. 4-4: Futterloser Kupolofen für vollständige Gasabsaugung
a) Füllschacht, b) Schürze (wassergekühlt), c) Gasentnahme, d) wassergekühlter Schacht, e) wassergekühlte Düse (Q.: Neumann)

Dieser Ofentyp ist bezüglich des Schlackenanfalls und insbesondere bei der Vermeidung von Ofenausbrüchen als besonders günstig einzustufen und entspricht dem Stand der Technik.

4.2.6 Futterloser, wassergekühlter Langzeit-Heißwind-Kupolofen (5b)

Diese Ofenvariante entspricht im wesentlichen dem oben beschriebenen futterlosen, wassergekühlten Kupolofen und zeichnet sich durch folgende Verfahrensmodifikationen aus:

- Futterloser, wassergekühlter Ofenschacht
- Zwei unter Ofendruck stehende Siphone, die sich im wechselseitigen Einsatz befinden. Damit ist die kontinuierliche Abnahme von Flüssigeisen und Schlacke möglich
- Durchgängiger Schmelzbetrieb im zwei- oder auch dreischichtigen Betrieb
- Ausbruch der feuerfesten Herdauskleidung frühestens alle drei Wochen
- Schwankungsfreie Eisenzusammensetzung und Eisentemperatur auch über lange Schmelzperioden
- Erzeugung verschiedener Eisensorten mit sehr geringen Mengen an Übergangseisen

Er kann bei Dauerbetrieb schlackenarm gefahren werden. Die Staubmengen sind aufgrund des geringeren Ofenabbrandes niedriger, Ofenausbruch fällt noch weniger als beim futterlosen Ofen an. Die spezifischen Schlackenmengen sind mit denen des futterlosen, wassergekühlten Kupolofens vergleichbar. Die Vermeidungsquote liegt zwischen 30 und 40 %, bezogen auf den Kaltwind-Kupolofen.

Der Langzeit-Heißwind-Kupolofen ist die zur Zeit technologisch am meisten ausgereifte, aber auch technisch aufwendigste Kupolofenvariante und, bezogen auf die produzierte Eisenmenge, die abfallärmste Verfahrensmodifikation. Er entspricht dem Stand der Technik. Es muß

aber berücksichtigt werden, daß diese technisch sehr aufwendige und automatisierte Anlage nur bei sehr hohen Schmelzmengen wirtschaftlich zum Einsatz gebracht wird.

4.2.7 Koksloser Kupolofen (6)

Bezüglich der Reststoffsituation ist diese in der Entwicklung befindliche Kupolofenvariante als besonders vorteilhaft zu bewerten. Hingewiesen sei auf den geringen Gichtgasstaubauswurf von ca. 1,5 kg/t Einsatz und den niedrigen SO_2-Anteil im Gichtgas durch den Einsatz von Erdgas oder Erdöl. Mit Koks befeuerte Öfen haben einen Staubauswurf bis zu 20 kg/t Einsatz. Durch den Verzicht auf Koks nehmen auch die Reststoffmengen der Schlacken und der sonstigen Stäube ab. Koksgrus entfällt vollständig und die Ofenausbruchmengen bewegen sich im Bereich der futterlosen Heißwind-Kupolöfen. Von Nachteil ist der Abbrand von ca. 30 bis 50 kg/t Flüssigeisen an Stützkugeln, die in die Schlacke eingehen.

Insgesamt kann eine durchschnittliche Vermeidungsquote aller Reststoffe von 40 bis 60 %, bezogen auf den Basis-Kaltwind-Kupolofen angenommen werden. Diese Quoten sind jedoch mit großen Unsicherheiten behaftet, da das Verfahren noch nicht großtechnisch betrieben wird.

Verfahrensbeschreibung

Der kokslose Kupolofen entwickelte sich aus der Zielsetzung, ein Schmelzaggregat zur Verfügung zu stellen, das emissionsarm betrieben werden kann und das auf Koks als Brennstoff nicht angewiesen ist.

Als Vorläufer des kokslosen Kupolofens ist der sogenannte Flavenofen zu betrachten, der eine Kombination von Schacht- und Herdofen darstellt. **Abbildung 4-5** zeigt den Aufbau des Systems. Es läßt erkennen, daß die Beschickungssäule, die normalerweise vom Koksbett getragen wird, auf wassergekühlten Roststäben ruht. Diese Roststäbe sind oberhalb der Brennerebene angebracht, so daß das herabtropfende Eisen durch den Rost bis in das Sammelbekken gelangt.

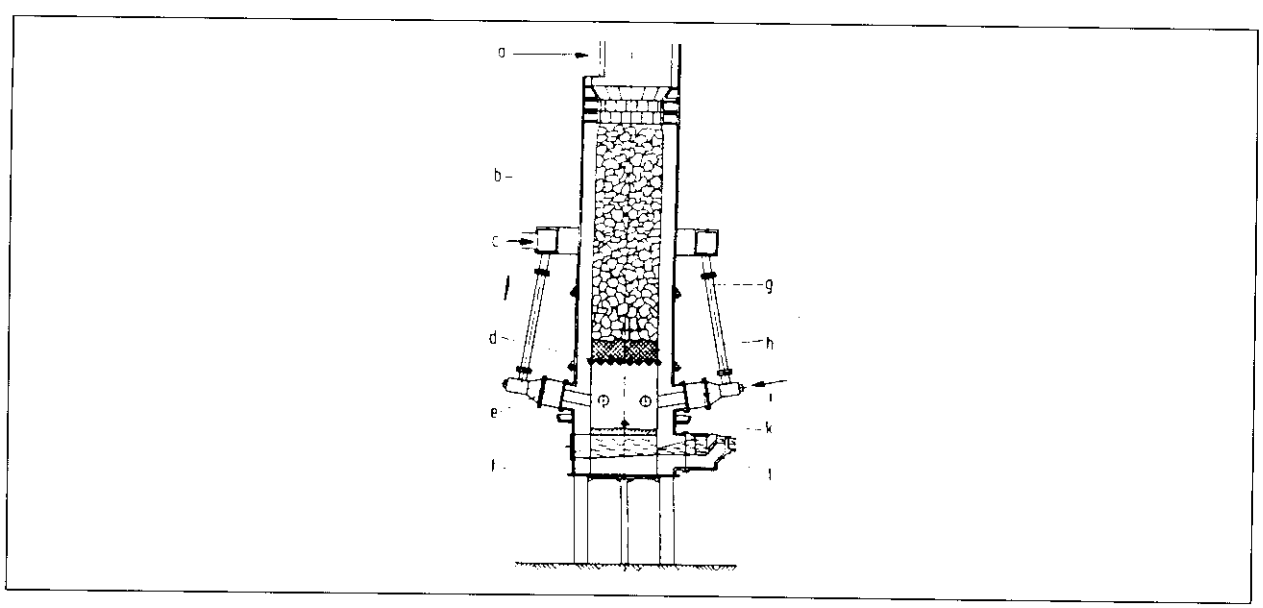


Abb. 4-5: Koksloser Kupolofen

a) Zuführung der Beschickung, b) Beschickung (Eisen und Kalkstein), c) Gebläse, d) Wassergekühlter Rost, e) Brenner, f) Einstiegsöffnung, g) Windleitung, h) Keramische Kugeln, i) Brennstoff, k) Aufkohlung, l) Siphon (Q.: Sachs)

Die Verbrennung von Gas oder Öl erfolgt in einer Brennermuffel außerhalb des Ofens. Die heißen Gase geben auf ihrem Wege durch den Ofenschacht ihre Wärme an die Beschickung ab. Da das glühende Koksbett als Träger der Überhitzungszone fehlt, tritt an dessen Stelle ein Bett aus einem kugelförmigen feuerfesten Material auf einem wassergekühlten Rost.

Nach Angaben von W. SACHS beträgt der Verbrauch an Feuerfestkugeln zwischen 30 bis 50 kg/t Einsatzmaterial. Die Kugeln werden ständig mit der Charge zwecks Ersatz neu eingebracht und ordnen sich in der Schmelzzone übereinander. Sie müssen eine Höhe von etwa 500 bis 700 mm als Schmelzzone aufrechterhalten. Es darf kein Verkleben der Kugeln im feuerfesten Bett bzw. am Rost auftreten, damit das Flüssigeisen ungehindert in das Ofenbett zum Siphon durchfließen kann.

Um die Erdgas- oder Ölenergie voll zu nutzen, stellt man eine oxidierende Flammenführung ein, was aber zwangsläufig einen erhöhten Abbrand an Eisen, Mangan, Silizium und Kohlenstoff nach sich zieht. Zur Vermeidung des starken Abbrandes arbeitet man vielfach mit einem Luftfaktor, der geringfügig unter 1 liegt, also unterstöchiometrisch eingestellt ist.

Angaben über die erzielten Abstichtemperaturen englischer Untersuchungen liegen meist nur im Bereich zwischen 1400 und 1480 °C. Diese Temperatur ist für bestimmte Gußsorten nicht ausreichend (z. B. GGG). Demzufolge findet man auch Hinweise auf ein erforderliches Duplizieren (Nachbehandeln im Induktions-Tiegelofen), um einerseits in der Temperatureinstellung flexibler arbeiten zu können und um andererseits das Aufkohlen und Legieren in der gewünschten Weise durchführen zu können.

Der Stahlschrottanteil der Charge muß wegen der fehlenden Aufkohlung möglichst niedrig gehalten werden. Es wurden zwar Versuchsschmelzungen mit 30 % Stahlschrott und 70 % Kreislaufmaterial angeführt, jedoch kann den Angaben über die Produktionsschmelzen entnommen werden, daß eine Gattierung von 40 % Kreislauf, 50 % Roheisen und 10 % Stahlschrott zu empfehlen ist.

Durch die Abwesenheit von Koks tritt die endotherme CO_2- oder H_2O-Reduktion nicht auf. Angaben über den Siliziumabbrand werden von W. SACHS mit 10 bis 15 % und für Mangan mit 5 bis 10 % gemacht.

Als metallurgischer Vorteil des kokslosen Ofens ist der gegenüber dem Koks-Kupolofen niedrige Schwefelgehalt erwähnenswert, der mit 0,01 % angegeben wird. Somit wäre dieses Eisen auch für die Herstellung von Sphäroguß geeignet, wenn die notwendige Überhitzung erreicht wird.

Der theoretische Gesamtwirkungsgrad, das ist die rechnerisch ermittelte Nutzenergie für das Flüssigeisen, beträgt etwa 45 %. Bei einer geforderten Überhitzung auf 1520 bis 1540 °C ist der stärkere Rückgang des Wirkungsgrads im Vergleich zu dem normalen Heißwind-Kupolofen von Nachteil. Verwendet man Öl anstelle von Erdgas, so ändern sich die Zusammenhänge nur wenig.

Die Entwicklung des kokslosen Ofens zur Praxisreife ist noch nicht abgeschlossen. Man bemüht sich insbesondere, höhere Abstichtemperaturen und damit eine bessere Überhitzung zu erzielen und strebt gleichzeitig eine höhere spezifische Schmelzleistung an. Das Interesse an dieser Kupolofenvariante in Verbindung mit der Energiesubstitution von Koks durch Erdgas nimmt zu. Der kokslose Kupolofen kann in Zukunft einen entscheidenden Beitrag zur Vermeidung von Reststoffen liefern.

4.2.8 Gasgefeuerter Koks-Kupolofen (7)

Die Reststoffsituation dieses Aggregats ist mit der des kokslosen Kupolofens vergleichbar. Von geringem Nachteil ist der geringfügige zusätzliche Anfall von Stäuben aus dem Kokseinsatz als Stütz- und Aufkohlungsmaterial. Von entscheidendem Vorteil hinsichtlich des Reststoffanfalls ist jedoch, daß im Vergleich zum kokslosen Kupolofen keine Stützmaterialien (Feuerfestkugeln) als Abfall entsorgt werden müssen. Die Reststoffvermeidungsquote kann zwischen 40 bis 50 % im Vergleich zum Kaltwind-Kupolofen betragen.

Verfahrensbeschreibung
Der in **Abb. 4-6** dargestellte gasgefeuerte Koks-Kupolofen ist in seiner Konzeption dem bereits beschriebenen kokslosen Kupolofen sehr ähnlich. Der Kokseinsatz wird fast vollständig durch Erdgas substituiert.

Anstelle des feuerfesten Kugelbetts bildet hier ein Koksbett im Gestell die tragende Säule. Der Koks dient aber nicht als Brennstoff, sondern als Stützbett unter den zu erschmelzenden Einsatzstoffen und zur Aufkohlung des Flüssigeisens. Der Koks als Stützmaterial ist preiswerter und im Betrieb unproblematischer als die Kugeln im kokslosen Kupolofen.

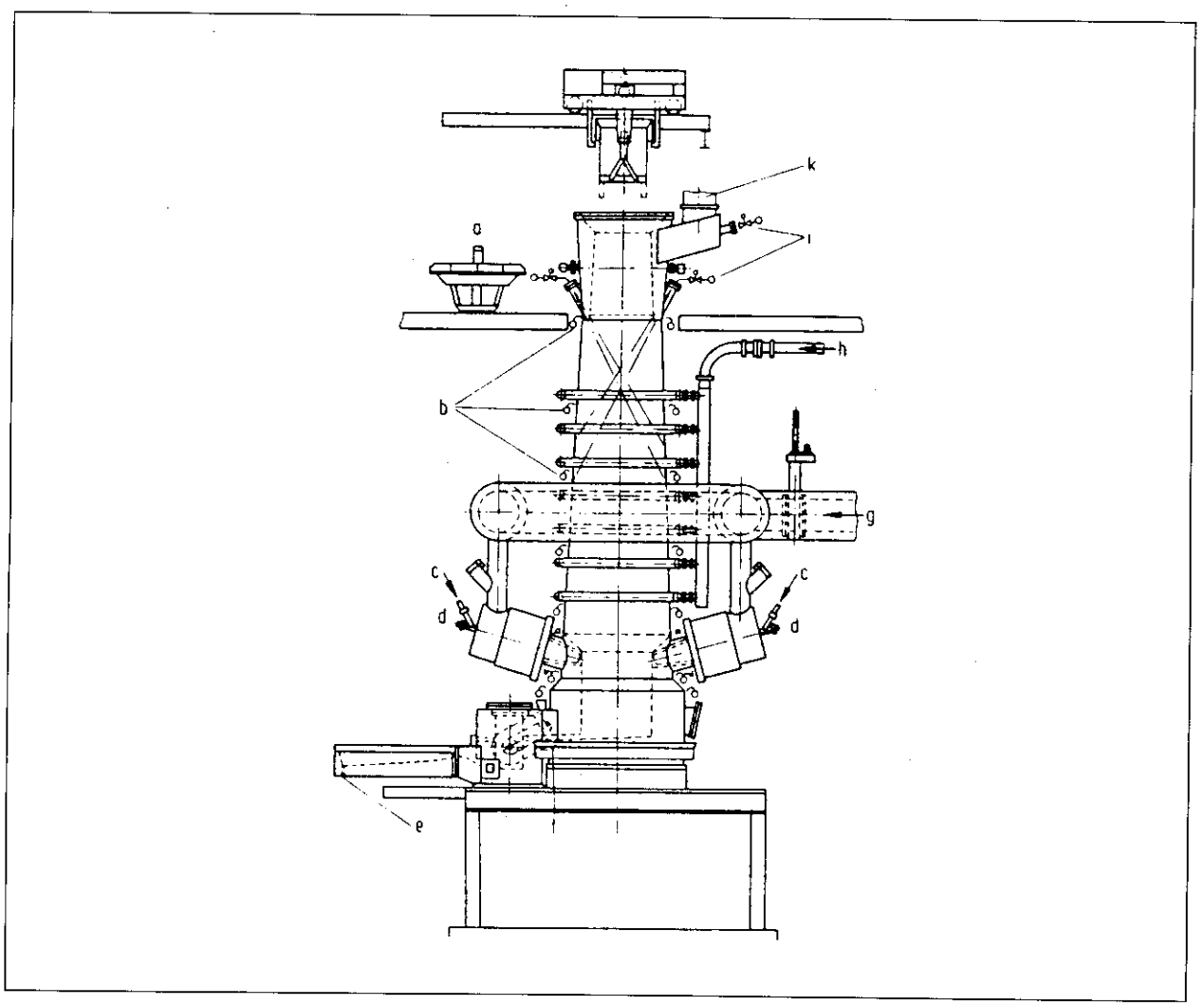


Abb. 4-6: Konstruktionsprinzip des gasgefeuerten Koks-Kupolofens
a) Ofendeckel, b) Mantelkühlung, c) Kohlenstaub oder Erdgas oder Heizöl, d) Schaufenster, e) Flüssigeiseneinlauf, f) Schlackenauslauf, g) Heißwind (700 °C), h) Verbrennungsluft, i) Wasserkühlung, k) Abgas (250 °C) (System Henza)

Ähnlich wie bei der Ölzusatzfeuerung hat man den Koks stufenweise um bis zu 40 % substituiert, was einer Kokssatzerniedrigung von 15 auf 9 % entspricht. Die Ölverbrennung ist vor dem Eintritt in den Ofenschacht durchzuführen. Durch Erdgassubstitution kann der Staubauswurf auf durchschnittlich 2 bis 3 kg/t Flüssigeisen verringert werden. Die folgende Abbildung zeigt den Zusammenhang zwischen Kokszusatzsubstitution und Staubmengenverringerung.

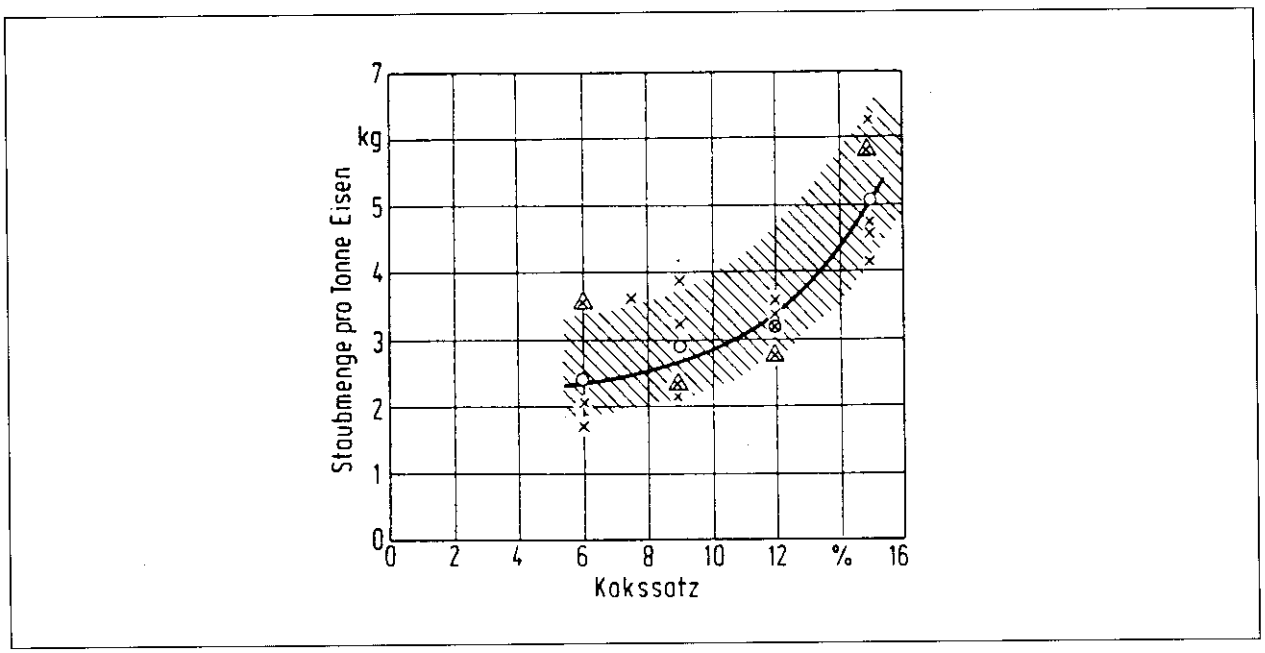


Abb. 4-7: Staubanfall in Beziehung zum Kokssatz/Verminderte Staubmenge bei Gaszusatzfeuerung
x) Tagesmittelwerte, o) gemittelte Tagesmittelwerte, Tagesmittelwert für Schmelzoptimum (Q.: Dahlmann, Schock, Orths)

Problematisch ist das Erreichen der notwendigen Verbrennungstemperatur von 1800 °C, wo bei einem Luftverhältnis von 0,6–0,7 eine Luftvorwärmung auf 700 °C vorgenommen werden muß. Hierbei erreicht man eine theoretische Verbrennungstemperatur von knapp 2 000 °C, die einer realen Gastemperatur von rund 1800 °C entspricht.

Dieses Verfahren ist zwar in der Praxis noch nicht erprobt, birgt aber interessante und erfolgversprechende Ideen in sich. Das Verfahren versucht, bei Verwendung von Erdgas als Brennstoff konsequent die Schwachpunkte des erörterten kokslosen Kupolofens zu vermeiden. Der gasgefeuerte Kupolofen kann in Zukunft einen wichtigen Beitrag zur Vermeidung von Reststoffen leisten.

Zur Beurteilung der technischen Durchführbarkeit und der Wirtschaftlichkeit kann noch keine Aussage getroffen werden; hierzu müssen die laufenden Untersuchungsergebnisse abgewartet werden.

4.2.9 Zusätzliche Vermeidungsmaßnahmen

Unter zusätzlichen Vermeidungsmaßnahmen sind solche zu verstehen, die nicht direkt mit apparativen Änderungen am Kupolofen selbst verbunden sind. Dazu gehören

- die Optimierung der Koksstückgrößen sowie
- der Einsatz von elektrisch betriebenen Induktionsöfen zum Warmhalten, Speichern und Duplizieren.

4.2.9.1 Koksstückgröße

Durch die Optimierung der Koksstückgrößen läßt sich Einfluß auf die Verbrennungstemperatur und die Verbrennungsleistung nehmen, wodurch der Einsatz an Koks gesenkt und somit der Reststoffanfall verringert wird.

In der folgenden Abbildung ist der Temperaturverlauf der Ofengase dargestellt. Der kleinstückige Koks von 25 mm Kantenlänge bringt zwar die höchste Verbrennungstemperatur, dadurch steigt jedoch die endotherme (energieverbrauchende) CO_2-Reduktion intensiver an, wodurch die Ofengastemperatur schon kurz oberhalb der Düsenebene bis unter die Temperatur des grobstückigen Kokses abfällt. In Verbindung mit der hieraus resultierenden niedrigeren Vorwärmung wird die Schmelzzone nach unten verlagert, so daß sich letztlich die Eisenüberhitzung verschlechtern kann.

Durch Einsatz des optimalen Koksstückdurchmessers sind Einsparungen der einzusetzenden Koksmenge und dadurch eine Verringerung der Staubmenge um bis zu 10 % möglich.

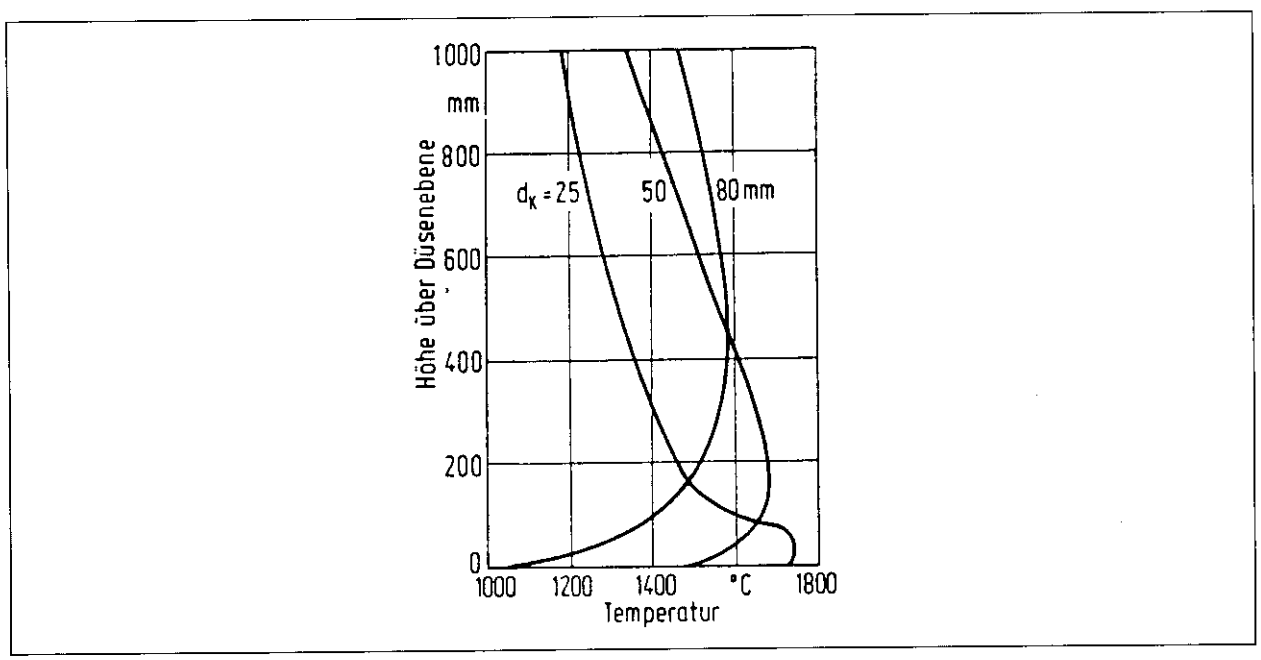


Abb. 4-8: Gastemperaturverlauf in der Randzone eines koksgefüllten Schachtofens bei unterschiedlicher Koksstückgröße; d_k Koksstückdurchmesser

4.2.9.2 Induktionsöfen als Vorherd zum Sammeln, Warmhalten und Duplizieren

Der Hauptzweck des Einsatzes von Kupolöfen nachgeschaltenen Induktionsöfen ist das Warmhalten und Duplizieren des Flüssigeisens. Das Flüssigeisen wird in den Kupolöfen auf die Abstichtemperatur erschmolzen und den Induktionsöfen übergeben, in denen anstelle von Koks elektrische Energie zum Warmhalten oder Nacherhitzen eingesetzt wird. Dadurch kann sich der anlagenbezogene Reststoffanfall pro Tonne Gußeisen verringern.

Induktions-Tiegelofen

Gebräuchlich ist die Verwendung eines getrennten, meist induktiv beheizten Tiegelofens zum Duplizieren, dem das Rinneneisen kontinuierlich zufließt. Außerdem wirkt der Induktionsofen gleichzeitig als Mischer, der einen Temperaturausgleich bietet.

Die Kombination von Kupolofen als Schmelzaggregat mit Induktionsofen als Überhitzungshilfe wird als Duplexbetrieb bezeichnet. Die Induktions-Tiegelöfen sind zumeist sauer ausgekleidet und haben eine geringere Standzeit als Rinnenöfen. Sie sind dafür aber temperaturwechselbeständiger und flexibler einzusetzen.

Induktions-Rinnenofen
Der Rinnenofen als Warmhalter für das Eisen des Kupolofens ist ein geschlossener Ofen mit einem Siphon am Einlauf und am Auslauf des Herdes. Das Eisen wird in diesem Ofen vor Oxidation geschützt, dadurch entstehen weniger Reststoffe. Rinnenöfen sind mit basischem Futter ausgestattet. Dieses ist nicht sehr temperaturbeständig, besitzt aber eine äußerst hohe Standzeit, die bis zu 3 Jahre betragen kann. Es fallen im Rinnenofen sehr geringe Ofenausbruchmengen an.

4.3 Aufbereitung und Verwertung der Abfälle/Reststoffe

Zur Beschreibung der Verwertung von Reststoffen aus Kupolofen-Schmelzanlagen ist es sinnvoll, für jeden Reststoff einen oder mehrere Verwertungswege aufzuzeigen. Denn im Unterschied zu den Vermeidungsmaßnahmen sind die Verwertungsmaßnahmen auf den bereits angefallenen Reststoff hin auszurichten. Vor der eigentlichen Verwertung, das heißt dem Wiedereinsatz eines Reststoffes als Sekundärrohstoff, müssen die Reststoffe eine **Vorbehandlung** bzw. **Aufbereitung** erfahren. Dadurch werden Reststoffe in technologische Formen umgewandelt, in der sie als Sekundärrohstoff wieder verwendbar sind.

Die Aufbereitung bezeichnet das Verfahren oder die Maßnahme, durch die der Reststoff stofflich dem Wiedereinsatz angepaßt wird. Nachfolgend werden für alle wesentlichen Reststoffe aus Kupolofen-Schmelzanlagen die Vorbehandlung, Verwertung und der Stand der Technik zunächst in einer Übersicht dargestellt und danach erläutert.

Abfall-/Reststoffart und Verwertungspotential in (Prozent)	Vorbehandlung (Maßnahmen)	Stoffliche Verwertung/ Einsatzgebiete	Stand der Technik/ Forschungsbedarf/ Bemerkungen
Kupolofenschlacke (80 - 100)	- Granulierung - Zerkleinerung	- Straßenbau (z. B. Unterbaumaterial) - Bauindustrie (z. B. Fertigbauteile) - Beimengung zu natürlichen Mineralstoffen	**Stand der Technik,** Die Schlacken stehen in Konkurrenz zu den Naturkiesen. Der Absatz ist derzeit nicht gesichert. Es besteht ein großer Bedarf an Vermittlungshilfe zwischen Erzeuger und Abnehmer.
Rinnenofenschlacke (80 - 100)	- Granulierung - Zerkleinerung	- Einsatz wie Kupolofenschlacke - Wiedereinsatz in der Hochofenindustrie zur Nutzung der Eisenanteile	**Stand der Technik** siehe Kupolofenschlacken.
Gichtgasstäube (zinkhaltig) (80 - 100)	- Aufkonzentration durch Wiedereindüsung in den Kupolofen - Aufbereitung und Abtrennung der Zinkanteile, z. B. im Wälzrohrverfahren	- Zinkverarbeitende Industrie	**Stand der Technik,** Bei einigen Ofentypen ist der Einfluß auf die Schmelze zu berücksichtigen.
Ofenausbrüche (0)	- Zerkleinerung	- Bisher keine Verwertung	**Forschungs- und Entwicklungsbedarf**
Koksgrus (100)	- Wiedereindüsung in Verbindung mit Ölen als Petrolkoks in den Kupolöfen zur Nutzung des Energieinhalts - Brikettierung	- Zusatzbrennstoff in Kupolöfen - Zusatzbrennstoff für Energie- oder Wärmeerzeugungsanlagen als Staub oder in Form von Briketts	**Stand der Technik** Koksgrus wird vereinzelt mit Erlösen an Verwerter abgegeben
Filterstäube (Rinnen und Förderbänder) (10 - 50)	- Wiedereindüsung zur Aufkonzentration vor allem der Eisenanteile	- Verwertung wie bei Gichtgasen überprüfen	**Forschungs- und Entwicklungsbedarf**

Tab. 4-4: Übersicht der Vorbehandlungs- und Verwertungsmöglichkeiten für Abfälle/Reststoffe aus dem Kupolofenbetrieb

4.3.1 Erarbeitung bundeseinheitlicher Regelungen für die Verwertung von Reststoffen

Die Verwertung von Reststoffen scheitert bisher häufig daran, daß keine einheitlichen Kriterien zur Bewertung existieren. Daher hat die Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) eine Arbeitsgruppe zur „Vereinheitlichung der Untersuchung und Bewertung von Reststoffen" gegründet. Diese AG erarbeitet zur Zeit technische Regeln zur Verwertung mineralischer Reststoffe, darunter auch Kupolofenschlacken (AS 31202) und Elektroofenschlacken (AS 31218).

Um die Umweltverträglichkeit bei der Verwertung von Schlacken zu beurteilen, ist insbesondere das enthaltene Schadstoffpotential und seine Auswirkungen auf das Grundwasser von Bedeutung. In den technischen Regeln sind die Probenahme und der Analysenumfang für jede Reststoffart festgelegt. Zur Beurteilung der Untersuchungsergebnisse dienen Zuordnungswerte, die die Verwertbarkeit nach Art der Anwendung (z. B. Tragschicht im Straßenunterbau) und Empfindlichkeit der in Frage kommenden Flächen regeln. Durch diese Regelungen soll eine wirtschaftliche Verwertung von Reststoffen unter konsequenter Berücksichtigung des Boden- und Grundwasserschutzes ermöglicht werden.

Die technischen Regeln werden nach ihrer Fertigstellung den Bundesländern von der LAGA zur Einführung empfohlen. Damit kann davon ausgegangen werden, daß die technischen Regeln im Laufe des Jahres 1995 in Baden-Württemberg durch einen entsprechenden Erlaß des Umweltministeriums in Kraft gesetzt werden.

4.3.2 Aufbereitung von Kupolofenschlacken

In allen Fällen muß die Schlacke stückig aufbereitet bzw. granuliert oder mechanisch zerkleinert werden. Dies erfolgt durch Granulierung im Wasserstrahl (nasses Verfahren) oder durch Zerkleinerung in Brechern oder Mühlen (trockene Verfahren).

4.3.2.1 Trockene Verfahren (mechan. Zerkleinerung)

Die trockenen Verfahren haben den Vorteil, daß die Schlacke nicht mit Wasser in Berührung kommt und daher kein Schwefelwasserstoff gebildet wird. Ein weiterer Vorteil ist die höhere Dichte und Festigkeit (ca. 2,7 kg/m^3) der trocken ausgekühlten Schlacken, was sich beim Einsatz z. B. im Straßenbau günstig auswirkt.

Die trockenen Verfahren haben den Nachteil, daß kein glasartiger Schlackensand oder Schlakkengranulat hergestellt werden kann, wie er sich bei einer schnellen Abkühlung der Schlacke im Wasserstrahl bildet. Die Schlackenbrocken müssen mit mechanischen Zerkleinerungsaggregaten energie- und kostenintensiv in ein gleichmäßiges Korngrößenspektrum umgewandelt werden.

Trockene Erstarrung der Schlacke in der Wanne und Zerkleinerung
Die aus den Siphonen auslaufende Schlacke fließt in gußeiserne Wannen, die auf dem Gießereiflur unter den Schlackenabflußrinnen stehen. In den Wannen erstarrt die schmelzflüssige Schlacke zu unterschiedlich großen Schlackenstücken. Die Schlacken sind in dieser Größe und Form nicht verwertbar und werden anschließend in Brechern oder Prallmühlen mechanisch zerkleinert.

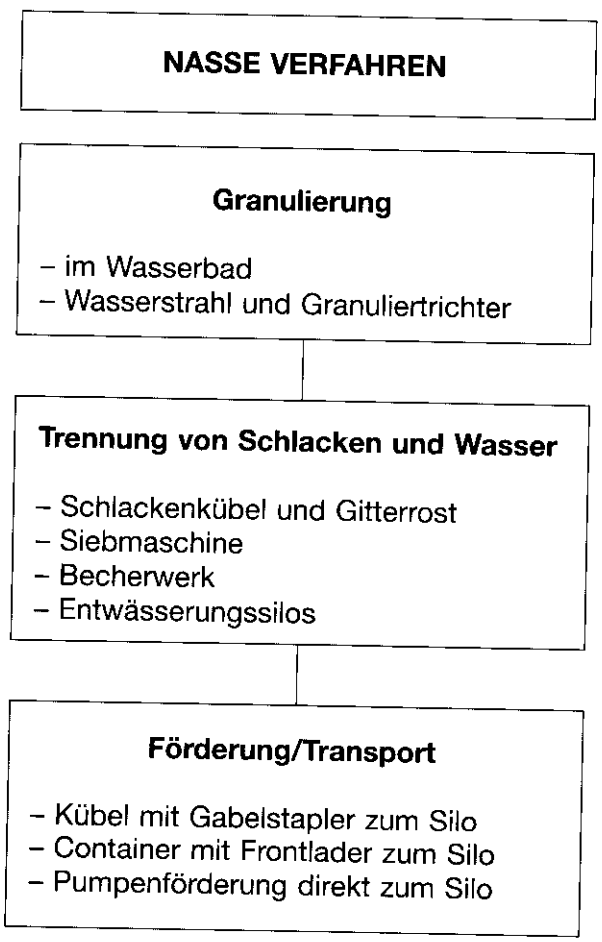
Trockene Erstarrung der Schlacke auf dem Plattenband
Die aus dem Siphon auslaufende Schlacke des Kupolofens erstarrt auf einem Plattenband, das mit gußeisernen Pfannen bestückt ist. Das Plattenband ist etwa 20 m lang. Die Schlakkenplatten werden durch ein Hammerwerk von den Pfannen gelöst, wenn sie nicht von selbst

an der Abwurfstelle des Plattenbandes aus den Pfannen fallen. Die im Unterturm des Plattenbandes zurücklaufenden Pfannen werden durch einen Luftstrom gekühlt.

Die auf den Pfannen erstarrten Schlackenplatten oder -stücke fallen am Abwurfende des Plattenbandes auf eine Schwingförderrinne. Dort werden sie bei der weiteren Förderung durch die Schwingungen weiter zerkleinert. Die zerkleinerten Schlackenstücke fallen am Ende des Förderers in einen Container. Nach Bedarf können die Schlacken in einer Prallmühle weiter zerkleinert werden.

4.3.2.2 Nasse Verfahren

Die nassen Verfahren der Schlackenbehandlung werden durch die nachfolgend dargestellten Verfahrensschritte charakterisiert:



Bei den modernen Verfahren fließt die Schlacke in einen Trichter, in dem der Schlackenstrom durch eine Flachdüse mit scharfem Wasserstrahl zerteilt wird und bei dem die Schlackenteile auf die Trichterwand prallen und dort im fließenden Wasser weiter zerkleinert werden. Eine feinkörnige und glasige Schlacke entsteht, wenn der Schlackenstrom in kleine Teilströme zerteilt wird. So entstehen Schlackenkörner mit Korngrößen von 5 bis 20 mm.

Von Vorteil bei den nassen Verfahren ist die Erzeugung von homogenen Schlackengranulaten in großen Mengen mit engem Korngrößenspektrum. Der Energieverbrauch ist geringer als der für die Zerkleinerung.

Als Nachteil der nassen Granulierverfahren ist die Entstehung von porigen und bröckligen Schlacken zu bewerten. Diese entstehen, wenn sich an der Grenzschicht von Wasser und Schlacke Wasserdampf bildet. Der Dampf diffundiert in die Schlacke und bildet die porige Struktur der Schlacke. Eine porige Schlacke kann auch entstehen, wenn die Schlackenzusammensetzung nicht stimmt oder eine sehr basische Schlacke gefahren wird. Die Verdampfung des Wassers an der Grenzschicht zwischen Wasser und Schlacke wird gemindert, wenn das Wasser gekühlt wird.

Nasse Granulierung und Trennung mit dem Schlackenkübel

Das Wasser und die Schlacke laufen aus dem Granuliertrichter durch die Schlackenrinne in einen Wasserkübel, der einen gelochten Boden und eine gelochte Wand hat. Das Granulierwasser läuft durch die Bohrungen des Kübels und durch ein Gitterrost in ein Wasserbecken.

Die feine Schlacke, die mit dem Wasser aus dem Kübel in die Wassersammelgrube läuft, wird in regelmäßigen Abständen entfernt. Das Wasser wird aus der Grube zu einem Kühlturm gepumpt, sammelt sich in einem Kaltwasserbecken und wird von dort zurück in den Granuliertrichter gepumpt.

Der Vorteil dieses Verfahrens ist der geringe apparative Aufwand und demgemäß die relativ geringen Investitionskosten.

Von Nachteil ist, daß die Lochböden leicht zusetzen und dadurch Betriebsstörungen zu unerwünschten Ausfallzeiten führen. Die Zusetzungen müssen entfernt werden. Außerdem ist die Schlackenkorngröße nicht in den erwünschten engen Bandbreiten zu erzeugen.

Nasse Granulierung und Planung mit der Siebmaschine

Das Wasser und die Schlacke laufen aus dem Granuliertrichter durch die Schlackenrinne auf eine Siebmaschine, in der im unteren Teil ein Spaltrost vorgesehen ist, durch den das Granulierwasser in den Auffangbehälter abläuft.

Die feine Schlacke, die mit dem Wasser durch das Sieb in den Behälter läuft, gelangt mit dem Rücklaufwasser ebenfalls in den Kühlturm, wo sie regelmäßig ausgeräumt werden muß.

Dieses Verfahren läßt sich kontinuierlich betreiben, es sind Schlacken der verschiedenen Korngrößen herzustellen je nach Wahl der Lochgrößen in den Lochblechen.

Von Nachteil ist die Störanfälligkeit durch Zusetzungen der Lochbleche, die mit erheblichem personellen Aufwand freigemacht werden müssen. Das Lochblech der Siebmaschine wird z. B. durch Preßlufthämmer freigehalten. Dadurch können sich die Betriebskosten stark erhöhen.

Nasse Granulierung und Trennung mit einem Becherwerk

Das Wasser und die Schlacke laufen aus dem Granuliertrichter durch die Schlackenrinne in das erste Absetzbecken, in das ein Becherwerk eingebaut ist. Die Schlacke wird durch die gelochten Becher aus dem Absetzbecken ausgetragen. Die feine Schlacke wird mit Überlaufwasser zum Teil in das zweite Absetzbecken ausgetragen. Die verbleibende Feinschlacke im ersten Absetzbecken wird regelmäßig ausgeräumt und deponiert. Die aus dem zweiten Absetzbecken ausgetragene Schlacke fällt direkt in einen Container, mit dem sie zum Verwerter oder zur Deponie gefahren wird. Die abgesetzte Feinschlacke wird durch eine Schlammpumpe aus diesem Becken in das erste Absetzbecken zurückgepumpt. Das aus dem zweiten Becken überlaufende Wasser hat kaum noch Feinschlacke. Es wird zum Kühlturm gepumpt und anschließend wieder zur Granulierung verwendet.

Vorteilhaft ist der vollautomatisierte kontinuierliche Betriebsablauf, der geringe Personalbedarf und der Durchsatz großer Schlackenmengen.

Von Nachteil ist der hohe Investitionsaufwand für die gesamte Granulieranlage. Die Becherlöcher können sich zusetzen und müssen manuell freigelegt werden, wodurch auch bei diesem Verfahren Störungen auftreten und Wartungspersonal erforderlich ist.

Nasse Granulierung mit Pumpenförderung in Entwässerungssilos
Wasser und Schlacke laufen aus dem Granuliertrichter durch die Schlackenrinne in einen Pumpensumpf. Das Gemisch aus Wasser und Schlackengranulat wird durch eine Schlauchleitung in ein Entwässerungssilo gepumpt. Das Wasser fließt im Überlauf aus dem Entwässerungssilo zu einem Kühlturm und aus dem Kühlturm in ein Kaltwasserbecken. Es sind zwei Entwässerungssilos vorgesehen, die täglich abwechselnd gefüllt werden.

Die Schlacke steht zur weiteren Entwässerung etwa einen Tag in dem Silo. Das durch den Schieber am Siloauslauf anfallende Wasser gelangt in ein Kaltwasserbecken und wird anschließend erneut als Granulierwasser eingesetzt.

Von Vorteil ist die weitgehende Automatisierung der Granulierung bis zum Verladen auf die Transportfahrzeuge. Der Personalbedarf an der Granulieranlage ist geringer als bei den anderen Verfahren. Beim Durchsatz sehr großer Schlackenmengen bietet sich dieses Verfahren bevorzugt an.

Nachteilig ist der hohe Energieaufwand für die Pumpen im Pumpensumpf, die einer starken Belastung ausgesetzt sind, wodurch die Laufräder verschleißen. Der apparative Aufwand und somit der Investitionsaufwand ist größer als bei den anderen Verfahren. Hinzu kommt die Verstopfungsgefahr in den Ableitungen zu den Silos. Außerdem ist die Korngrößeneinstellung nicht exakt steuerbar; es muß ein relativ breites Korngrößenspektrum in Kauf genommen werden.

4.3.2.3 Verwertung der Kupolofenschlacken

Die Kupolofenschlacken sind aufbereitet nahezu vollständig wiederverwertbar. Das Verwertungspotential beträgt zwischen 80–100 Prozent.

Folgende Einsatzgebiete und Verwendungen als Sekundärrohstoff sind bekannt:

- Die Bauindustrie kann die Schlacke als Unterbau für den Straßenbau einsetzen.
- Es werden Fertigbetonteile hergestellt, bei denen die Schlacke als Zuschlagstoff verwendet wird.
- Beimengung zu natürlichen Mineralstoffen

4.3.3 Rinnenofenschlacke

4.3.3.1 Aufbereitung der Rinnenofenschlacken

Grundsätzlich können die Rinnenofenschlacken mit denselben Granulierverfahren wie Kupolofenschlacken aufbereitet werden.

Da die Rinnenofenschlacken eisenhaltiger als die Kupolofenschlacke sind, ist außerdem ihr Wiedereinsatz in Schmelzaggregaten der Hochofenindustrie zu prüfen. Dort könnten die Fe-metallischen Anteile bei der Erzeugung von Roheisen und Stahl genutzt werden. Dafür sind möglicherweise Aufbereitungstechnologien zur Aufkonzentrierung der Fe-Metall-Anteile in der Kupolofenanlage einzusetzen, wobei die Trennung der metallischen von den mineralischen An-

teilen erfolgt. Die metallarme mineralische Schlacke kann mit der Kupolofenschlacke zusammen granuliert werden. Nur die hochmetallischen Wertstoffe müßten zu den Hochöfen transportiert werden. Es ist nicht bekannt, daß dies bereits praktiziert wird. Es besteht ein Forschungs- und Entwicklungsbedarf zur Klärung dieser Fragen.

4.3.3.2 Verwertung der Rinnenofenschlacken

Für die Rinnenofenschlacken sind grundsätzlich dieselben Verwertungsmöglichkeiten wie für die Kupolofenschlacken möglich. Die Rinnenofenschlacken sind ebenfalls zu 80 bis 100 % verwertbar.

4.3.4 Gichtgasstäube

Durch den zunehmenden Einsatz von verzinkten Blechen als Stahlschrott reichern sich die Gichtgasstäube stark mit Zink an. Nach Aussagen eines Verwerters ist die Voraussetzung zur wirtschaftlichen Verwertung der Zinkanteile im Staub ein Zinkgehalt von mehr als 16 %. Die Vorbehandlung der Stäube erfolgt durch Aufkonzentration im Kupolofen und die nachfolgende Trennung der Zinkanteile von den restlichen Bestandteilen durch das Wälzrohrverfahren.

4.3.4.1 Aufkonzentrieren der Gichtgasstäube im Kupolofen

Die Aufkonzentrierung erfolgt durch Wiedereindüsung der Stäube in den Kupolofen, bis der gewünschte Zinkgehalt erreicht ist. Dann wird der Staub ausgeschleust und zur Verwertung abgegeben.

Die Wiedereindüsung erfolgt durch die Heißwinddüsen. Dazu wird eine Einschleusevorrichtung mit speziellen Düsen in den Heißwindkanal montiert. Die Stäube werden angemischt den Düsen zugeführt. Derzeit sind in einigen Kupolöfen Probeläufe im Gange. Die technischen Probleme sind jedoch weitgehend gelöst. In der Bundesrepublik sind Wiedereindüsungen großtechnisch verwirklicht. Die Investitionskosten zur Eindüsung bewegen sich zwischen 100 000 bis 400 000 DM, je nach dem erforderlichen Durchsatz und den spezifischen betrieblichen Anpassungen.

Es wird auch geprüft, anstelle von Stückkoks, der oben in den Ofen zuchargiert wird, Koks-Gichtgasstaubpellets in der Höhe des Windstocks einzubringen. Der Vorteil liegt darin, daß keine gesonderte Eindüsung für die Stäube installiert werden müßte. Ob sich dieses Verfahren durchsetzen kann, hängt im wesentlichen von den Wirkungen der Pellets auf den Schmelzprozeß ab. Dieses Verfahren ist noch in Entwicklung.

Der Gichtgasstaub kann mit Staubpetrolkoks zusammen pelletiert bzw. verpreßt werden.

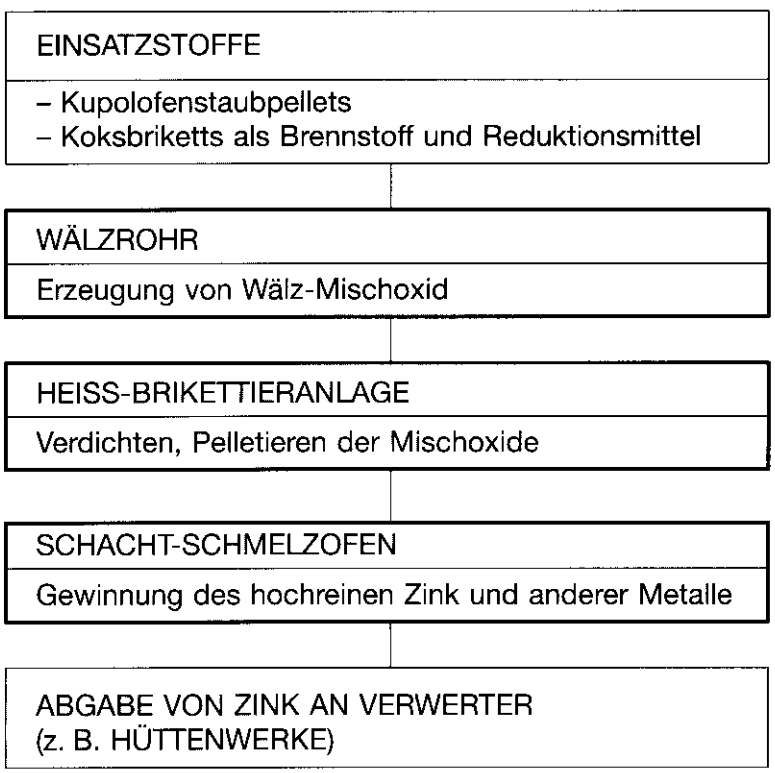
Gichtgasstaubanforderungen
Das Wälzrohrverfahren verarbeitet nach Aussagen des Betreibers auch Kupolofengichtgasstäube, wenn diese den folgenden Anlieferbedingungen genügen:

- Der Zinkgehalt im Staub muß mehr als 16 % betragen
- Chlor- und Alkaligehalte werden für den jeweiligen Hüttenbetrieb festgesetzt
- Grundsätzlich ist eine Vorbegutachtung von Probenmaterial erforderlich
- Die Anlieferung muß in staubfreien Pellets erfolgen.

4.3.4.2 Externe Aufbereitung der Gichtgasstäube im Wälzrohr

Gesamtprozeß
Seit mehr als 15 Jahren ist das Wälzverfahren bei „Berzelius" in Duisburg zur Verwertung der zinn- und bleihaltigen Stäube und Schlämme aus Hüttenbetrieben im Einsatz. Dieses Verfahren ist zur Aufbereitung und Verwertung der zinkhaltigen Gichtgasstäube aus Kupolöfen geeignet. Der Gesamtprozeß besteht aus den folgenden Verfahrensstufen:

- Wälzrohr zur Erzeugung von zinkhaltigen Metalloxiden (1. Stufe),
- Heißbrikettieranlage zum Pelletieren der staubartigen Metalloxide (2. Stufe),
- Schmelz-Schachtofen zur Gewinnung des hochreinen Zink und anderer Metalle (3. Stufe)



Die Kosten für die Behandlung von Kupolofenstäuben liegen in einer Größenordnung von 100–200 DM/t Gichtgasstaub. Die Kosten sind abhängig von den Transportkosten, der Staubzusammensetzung und dem Anlieferungszustand.

4.3.5 Ofenausbrüche aus Rinnenofen und Siphonen

Ofenausbrüche eignen sich nur bedingt zur Verwertung; zu berücksichtigen sind mögliche schädliche Schwermetalle, wodurch ihre umweltverträgliche Verwertung in Frage gestellt werden muß. Ein Verwertungspotential kann gegenwärtig nicht angegeben werden.

Durch die Vielfalt der Inhaltsstoffe in Ofenausbrüchen und deren Beschaffenheit wird auch zukünftig die stoffliche Verwertung schwierig sein. Dies liegt auch an den relativ geringen Mengen, für die eine anwendungsorientierte Aufbereitung im allgemeinen nicht wirtschaftlich ist. Ofenausbrüche sind außerdem nicht in dem Maße inert bzw. glasartig wie die Schlacken. Sie bestehen aus steinähnlichen Brocken (Quarzitsteine). Untersuchungen der technologischen Eigenschaften und chemische Analysen von Ofenausbrüchen sind ein wichtiger Schritt in die Richtung, Verwertungsmöglichkeiten zu entwickeln und schrittweise einzuführen.

4.3.6 Koksgrus

Koksgrus ist von Transportbändern abgesiebtes Unterkorn bzw. Feinkorn mit einer Korngröße kleiner 6 mm. Aufgrund seines hohen Heizwerts muß darauf hingewirkt werden, daß Koksgrus wieder als Brennstoff eingesetzt wird. Koksgrus kann grundsätzlich als Brennstoff zu 100 % in Kupolofenanlagen selbst oder in anderen energieerzeugenden Anlagen als Zusatzbrennstoff wiederverwertet werden.

Zur Wiedereindüsung müssen größere Kokskörner auf gleichmäßige düsengängige Korngrößen gemahlen werden. Zu prüfen sind die zusätzlichen Maßnahmen der Wiedereindüsung in den Kupolofen zusammen mit den Stäuben oder die Pelletierung als Ersatzbrennstoff anstelle von Kupolofenkoks.

Außerdem ist zu überprüfen, in welchen externen Verbrennungsanlagen der Koksgrus wiedereinsetzbar ist und in welcher Form er dafür aufbereitet werden muß.

In einigen Fällen werden Koksgruse bereits an externe Verwerter in energieerzeugenden Anlagen als Zusatzbrennstoff verwertet. Nach Aussagen von Betrieben bringt die Koksgrusverwertung einen finanziellen Vorteil. Eine beispielhafte Zusammensetzung von Koksgrus ist in Kapitel 3.5 zu finden.

4.3.7 Sonstige Stäube oder Filterstäube

Filterstäube aus der Gattierung, den Transportbändern, über dem Einwurfschacht des Ofens und von den Rinnen werden örtlich abgesaugt und einer Filteranlage zugeführt, wo sie zumeist in Gewebefiltern zurückgehalten werden. Diese Filterstäube oder sonstigen Stäube sind sehr vielfältig in ihren Zusammensetzungen. Die in den Stäuben enthaltenen festen Stoffe sind zum Großteil unverbrannte Kokspartikel, Asche, Oxide, Schmutzanhaftungen wie Sand, Kalkstaub und Abrieb vom Ofenfutter. Sie enthalten in unterschiedlichen Mengen Oxide von Eisen, Zink, Blei, Cadmium, Chrom, Nickel, Cobalt, Arsen und andere Begleitstoffe. Das Verwertungspotential für die Filterstäube liegt zwischen 10 bis 50 %.

Aufbereitung
Voraussetzung zur Verwertung ist der richtige Umgang mit den Stäuben durch rechtzeitige Getrennthaltung. Möglicherweise erfordern die meisten noch zu ermittelnden Verwertungswege das Trennen von Stäuben in z. B. eisenhaltige, zinkhaltige etc. Stäube. Deshalb sind Analysen der Stäube aller wichtigen Staubquellen durchzuführen. Alle Stäube, die gleiche oder ähnliche Zusammensetzung haben, sollten in eine gemeinsame Filteranlage geführt werden.

Bei den zu erwartenden drastischen Kostensteigerungen zur Ablagerung der Stäube sind für die Unternehmen langfristig wirtschaftliche Vorteile durch Verwertung zu erwarten.

Die Stauberfassung erfolgt je nach anlagenspezifischen Verhältnissen durch:

- **Totaleinhausung** des Ofens mit Öffnungen zum Ausgießen, mit Sichtöffnungen für das Bedienungspersonal und einer Rinnenchargierung

- **Schwenkhauben,** auf der Ofenplattform oder der Chargierebene befestigt, mit hydraulischem Antrieb zum horizontalen Schwenken, ebenfalls möglichst mit Rinnenchargierung oder Chargierwagen

- **Höhenverstellbare** Absaughauben mit Schwenkeinrichtungen, wobei noch Erfassungsprobleme während des Ofendeckelschwenkens auftreten.

Verwertung
Wenn ausreichend brennbare Bestandteile wie Koksstäube im Staub enthalten sind, ist eine interne Verwertung anzustreben.

Die externe Verwertung bietet sich dann an, wenn der Staub Wertstoffe enthält, für die in anderen industriellen Bereichen ein Bedarf besteht. Dies gilt für die Zink- oder Eisenanteile. Bei hohen Zinkanteilen bietet sich das Aufkonzentrieren der Stäube mit den zinkhaltigen Gichtgasstäuben in der eigenen Schmelzanlage durch Wiedereindüsen an mit der nachfolgenden Abgabe der aufkonzentrierten Zinkstäube an den Verwerterbetrieb.

Bei ausreichend hohen Eisenoxidanteilen im Staub ist die Abgabe an Hüttenwerke zu erwägen. Dort könnten sie in vorhandenen Pelletieranlagen mit anderen Stäuben zu Pellets von hoher Dichte aufbereitet werden. Die eisenhaltigen Pellets werden in LD-Konvertern wiederaufgeschmolzen oder die Stäube werden in die Schmelze eingedüst. Die Metalle werden genutzt. Die verbleibenden mineralischen Bestandteile werden in die Schlacke des Konverters eingebunden.

Teil B – IST-Analyse des untersuchten Betriebes

5 Beschreibung des untersuchten Betriebes

5.1 Leistungsangebot

In der Kupolofen-Schmelzanlage des untersuchten Betriebs wird Flüssigeisen für etwa 60 000 t guter Guß jährlich erschmolzen. Die Gußsorten sind vorwiegend Gußeisen mit Kugelgraphit (Sphäroguß) sowie Gußeisen durch Tempern (Temperguß). Die vorgenannten Gußeisensorten werden der Gießerei vor allem für Automobilgußteile und Rohrfittings zur Verfügung gestellt. Die Gußprodukte sind Fahrwerk- und Antriebsteile für den Pkw- und Nutzfahrzeugmarkt. Dabei werden Gußteile mit Stückgewichten von 0,1 bis 150 kg gefertigt.

5.2 Mitarbeiter

Das Unternehmen beschäftigt ca. 2500 Mitarbeiter, wovon etwa 51 % im Automobilguß-, 25 % im Fittingbereich und die restlichen Mitarbeiter in sonstigen Bereichen tätig sind.

In der untersuchten Kupolofen-Schmelzanlage sind folgende Mitarbeiter beschäftigt:

- 1 Ingenieur
- 3 Meister
- 3 Vorarbeiter
- 12 Schmelzer und Betriebspersonal
- 1 Techniker

Die Kupolofen-Schmelzanlage wird dreischichtig betrieben.

5.3 Gebäude und Lage der Schmelzanlage

Die gesamte Grundstücksfläche des Unternehmens beträgt etwa 380 000 m^2, wovon etwa 70 % als Industriegelände bebaut sind, wovon der Schmelzbetrieb der untersuchten Anlage etwa 1 % der Fläche in Anspruch nimmt.

5.4 Maschinelle und apparative Ausstattung

Nachfolgend wird die neu errichtete Schmelzerei III beschrieben, die mit einem futterlosen Langzeit-Heißwind-Kupolofen ausgerüstet ist. Dieser ersetzt die ehemaligen alten Schmelzereien I und II (je 2 Kupolöfen). Die Technologien in den Schmelzereien I und II entsprechen nicht mehr dem Stand der Technik. Die Schmelzerei I ist bereits demontiert.

Die neue Schmelzerei III besteht aus folgenden wesentlichen Anlagengruppen:

- Gattierungsanlage
- Kupolofenanlage
- 2 Induktions-Rinnenöfen
- Staubrückführung und Schlackengranulierung (in Planung)
- Gichtgasverbrennung und Heißwinderzeugung
- Filteranlagen
- 4 Induktionsschmelzöfen für den Duplexbetrieb (in Planung)

Die folgende **Abbildung 5-1** zeigt schematisch die Anordnung der wesentlichen Anlagenkomponenten in der untersuchten Kupolofen-Schmelzanlage.

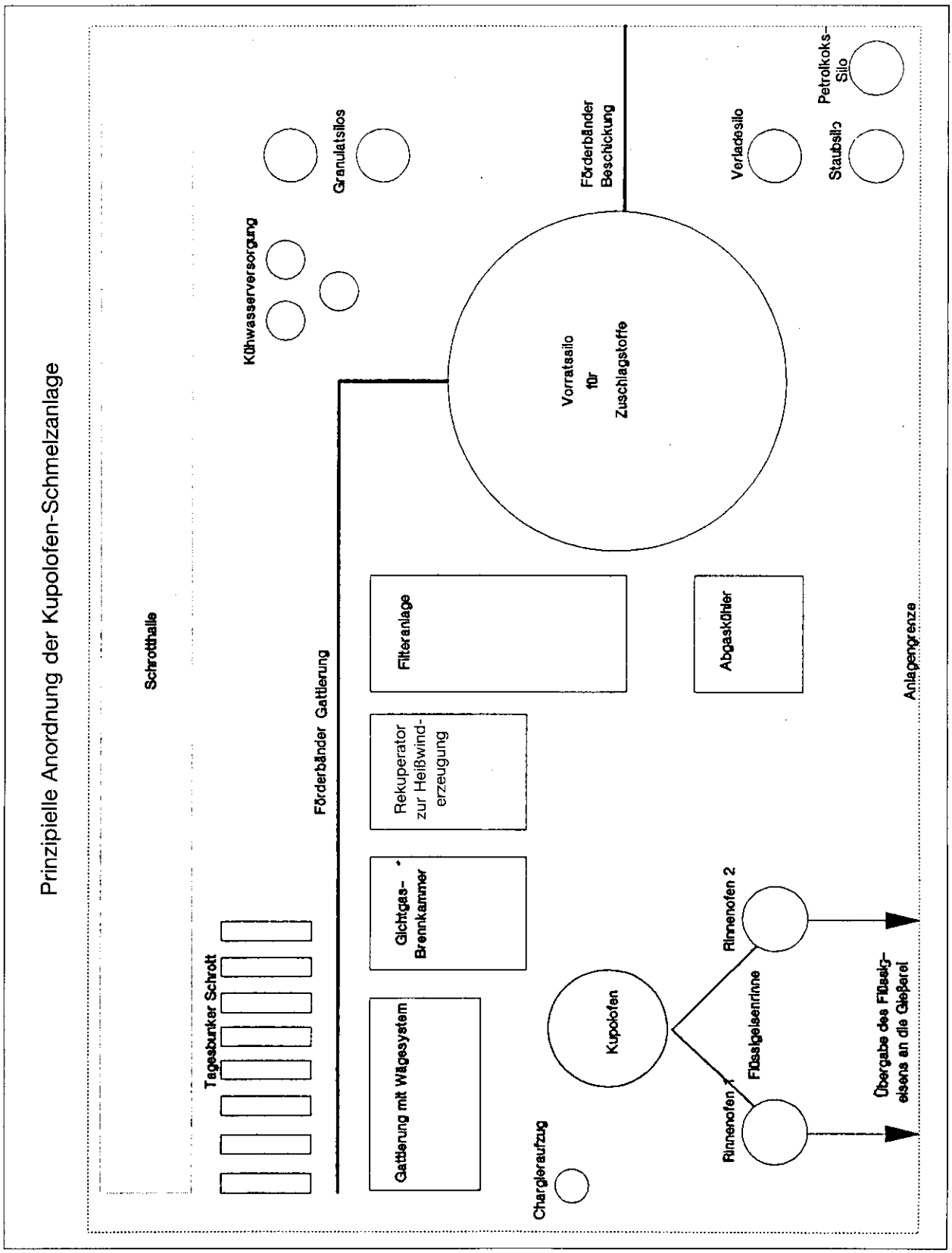


Abb. 5-1: Anordnung der Anlagenkomponenten in der untersuchten Kupolofen-Schmelzanlage

Die Heißwind-Kupolofenanlage dient zur Erzeugung von großen Mengen an flüssigem Eisen. Die folgenden Gußarten werden entweder im Kupolofen selbst oder in den Nachbehandlungsöfen Duplexbetrieb fertiggestellt:

- **G**ußeisen durch **T**empern (GT) bzw. Temperguß
- **G**ußeisen mit **G**lobularem **G**raphit oder Gußeisen mit Kugelgraphit (GGG)

Die Anlage ist für eine Schmelzleistung von maximal 50 t/h im 3schichtigen Betrieb ausgelegt. Der ununterbrochene Schmelzbetrieb von 6 Wochen und mehr ist möglich.

Die Einsatzmaterialien, Zuschläge und Brennstoffe werden in Bunkern und Lagerhallenboxen gelagert. In der Gattierungsanlage werden die erforderlichen Schmelzgutmischungen zusammengestellt und dem Kupolofen mit Krananlagen zugeführt.

Zum Einschmelzen der Einsatzmaterialien und Zuschläge sowie für die metallurgische Prozeßführung wird Koks verwendet. Der Koks wird in Silos bereitgestellt und mit Förderbändern zum Kupolofen transportiert.

Das im Kupolofen beim Schmelzprozeß entstehende Gichtgas wird unterhalb der Gichtöffnung vollständig abgesaugt, das CO in der Brennkammer verbrannt. Das verbrannte Abgas wird nach Kühlung durch ein Gewebefilter entstaubt in die Atmosphäre entlassen. Der Heißwind wird im Rekuperator (Wärmetauscher) erzeugt und über die Heißwinddüsen in den Ofen eingeblasen.

5.5 Ablauf der Arbeiten

Der Arbeitsablauf beim Schmelzen von Flüssigeisen im Kupolofen ist in **Abbildung 5-2** schematisch dargestellt. Nach dem Dosieren und Vermischen (Gattieren) der Eisenträger, Legierungsbestandteile, Zuschläge, Koks und Kalkstein wird die zusammengestellte Charge in den Kupolofen eingeworfen. Ein Füllstandsmeßgerät gibt die Steuerimpulse zum Nachfüllen des Ofens an die Befüllanlage in der Gattierung. Die Charge wird mittels der Verbrennungswärme des Schmelzkokses und mit Hilfe des Heißwinds in der Schmelzzone oberhalb der Blasformen bei etwa 1450 bis 1550 °C kontinuierlich verflüssigt. Über die Blasformen wird der Heißwind etwa 1 m über dem Ofenboden in den Kupolofen eingedüst. In dieser Zone spielt sich die eigentliche Schlackenarbeit ab, bei der das gewünschte Eisen erzeugt wird. Die spezifisch leichtere Schlacke schwimmt auf dem Eisen. Die metallurgische Schlackenreaktion erfolgt in einem Drucksiphon.

Das geschmolzene Flüssigeisen und die Schlacke werden durch Siphone kontinuierlich ausgeschleust. Das Flüssigeisen wird unmittelbar in die Warmhalteöfen geleitet. An dieser Stelle ist während des Untersuchungszeitraumes eine Schlackengranulierung in Wasser vorgesehen.

Je nach erforderlichem Schmelzprodukt wird eine Magnesiumbehandlung zur Erzeugung von Kugelgraphitguß im +GF+-Konverter vorgenommen. Die fertigen Gußeisensorten werden im Konverter zu den Vergießöfen transportiert.

Die Gichtgase werden verbrannt, der Heißwind in Rekuperatoren erzeugt und die Stäube in Filteranlagen abgeschieden. Das Kühlwasser für Ofenwand und Heißwinddüsen wird über die Wasseraufbereitungsanlage im Kreislauf zu den Schmelzaggregaten zurückgeführt. Vorgesehen ist die Gichtgasstaubrückführung.

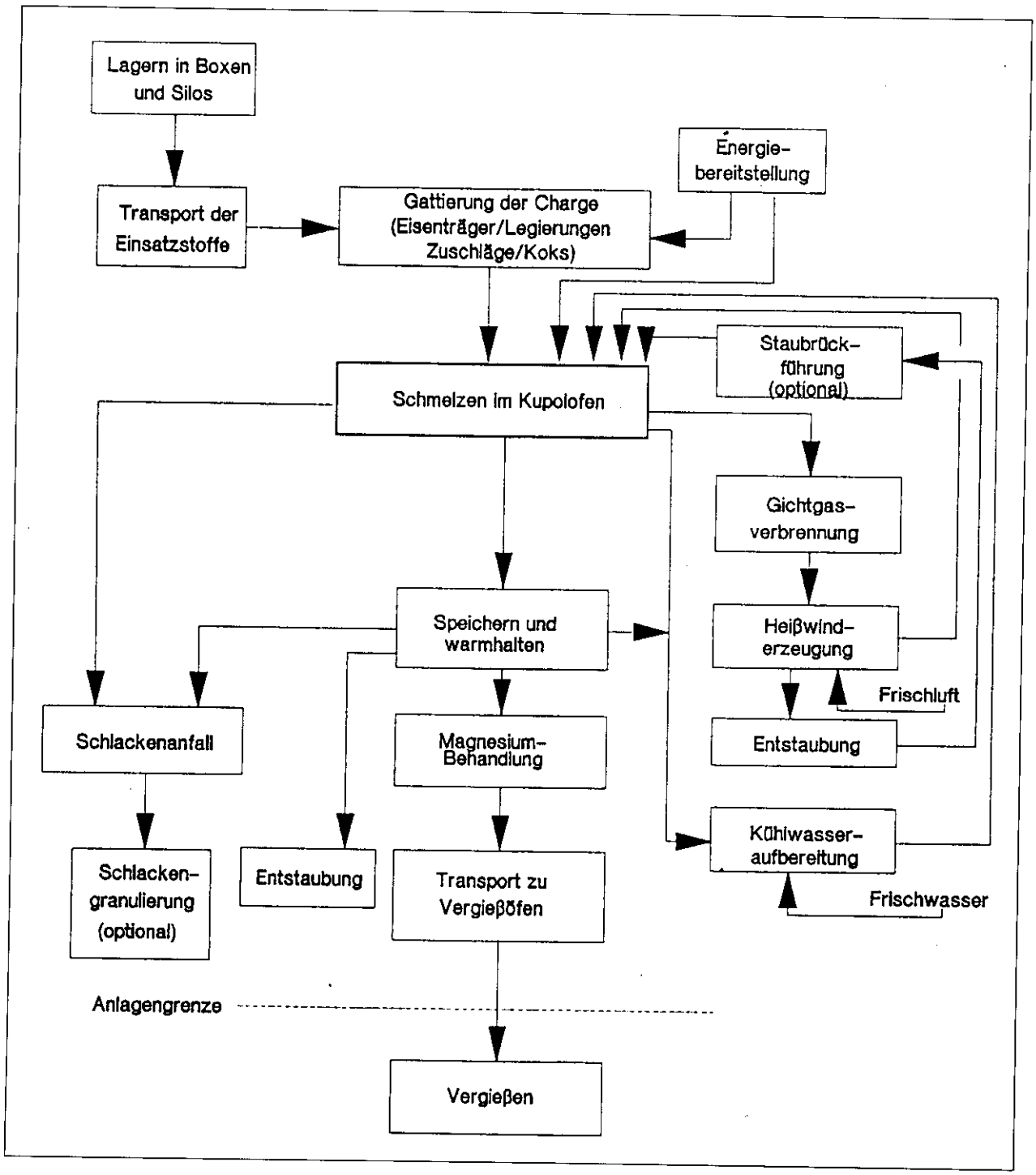


Abb. 5-2: Schematischer Ablauf des Kupolofenbetriebes

5.6 Beschreibung der Kupolofen-Schmelzanlage

Die Anlagengruppen der Schmelzanlage teilen sich wie folgt auf:

- Gattierungs- und Bevorratungsanlage für die Einsatzstoffe
- Heißwind-Kupolofen mit
  .Kühlwasserversorgung
  .Begichtungsanlage
  .Rekuperator mit Feuerraum zur Verbrennung der Gichtgase
  .Abgaskühler
  .Gewebefilter

- Beide Induktions-Rinnenöfen
- Staubrückführung und Schlackengranulierung (geplant)

Die Positionsnummern () der folgenden Anlagenbeschreibung finden sich in den Verfahrensfließbildern im Anhang wieder. Die Abbildungen umfassen im einzelnen:

Abbildung 5-1/1 im Anhang (Schrotthalle und Gattierung)
Abbildung 5-1/2 im Anhang (Kupolofenanlage und Kühlwasserversorgung)
Abbildung 5-1/3 im Anhang (Rekuperator, Filteranlage, Abgaskühlung)
Abbildung 5-1/4 im Anhang (Speicheröfen mit Kühlwasserversorgung)
Abbildung 5-1/5 im Anhang (Staubentsorgung und Legende zu den Beilagen)

5.6.1 Vorratslager/Gattierung/Begichtung

Die für den Kupolofen-Schmelzbetrieb benötigten Zuschlagstoffe wie Koks, Kalkstein, Basalt, Siliziumkarbid und Mangan werden mittels Waggon oder Lkws angeliefert und in einem Bunker (Vorratssilo) gelagert. Die Gattierungseinrichtungen nach der Bunkeranlage sind geeignet, genau dosierte Mengen dieser Materialien zu entnehmen und dem Kupolofen zuzuführen.

Entladestation
Die ankommenden Waggons bzw. Lkws werden in einen Tiefbunker entleert (57). Das Material wird aus diesem Bunker mittels einer Förderrinne (58) abgezogen und einem Förderband (3) übergeben. Die Förderleistung der Förderrinne (58) wird programmgesteuert dem zu fördernden Schüttgut angepaßt. Zur Verminderung der beim Entleeren in den Bunker entstehenden Geräusche wird die Entladestation (70) eingehaust und mit geeigneten Türen versehen.

Vorratssilo
Das Vorratssilo (4) ist in Stahl- oder Stahlbetonkonstruktion ausgeführt. Es besteht aus Bunkertaschen, die aus zwei konzentrisch angeordneten Zylindern mit den erforderlichen aussteifenden Zwischenwänden ausgebildet sind. Im unteren Bereich sind Bunkerausläufe mit Austragrinnen angeordnet.

Füllvolumina:

- Koks ca. 5 000 m^3 entsprechend ca. 2 500 t, unterteilt in 4 Taschen
- Kalkstein, Basalt, SiC und Mn, je ca. 150 m^3, entsprechend 300–400 t je Tasche

Bunkerbeschickung
Mittels des Förderbandes (3) werden die Einsatzmaterialien von der Entladestation zur Verteilerstation oberhalb des Silos transportiert. Das Fördergut gelangt vom Förderband (3) auf der Mittelachse des Silos auf ein reversierbares Förderband (60).

Bunkerabzug
Unterhalb des Silos sind 8 thyristorgesteuerte Magnetförderrinnen angeordnet. Die satzweise Verwägung von Koks und Zuschlagstoffen geschieht über eine Wiegevorrichtung (6), die nach der Bunkeranlage angeordnet ist.

Gattierungs- und Begichtungsanlage
Das metallische Einsatzmaterial (1) wird mittels Magnetkran (2) den Entnahmebunkern zugeführt. Die übrigen Einsatzmaterialien gelangen über Förderbänder (3) in die Vorratsbunker (4), die mit Abzugseinrichtungen versehen sind. Mit Schwingförderern werden die erforderlichen Stoffe abgezogen und auf einer Bandwaage (5) zu einer Charge verwogen. Die Charge wird in einem Begichtungskübel zusammengestellt, der auf einem Kübelwagen (8) steht. Das Satzgewicht pro Charge beträgt etwa 4 000 kg. Der Begichtungskübel wird mittels Kübelwagen vom Übergabepunkt der Waage zum Aufnahmepunkt der Begichtungskatze (9) transportiert.

Die Zuschlagstoffe werden aus dem Vorratsbunker (4) über Förderbänder (71) abgezogen und einem Verwiegebehälter (6) zudosiert. Die fertiggestellte Zuschlagstoffcharge wird auf das bereits verwogene metallische Einsatzmaterial im Begichtungskübel geworfen.

Begichtung bzw. Befüllung
Die Traverse (Ausleger) der Begichtungskatze nimmt den gefüllten Begichtungskübel auf und fördert diesen auf Höhe der Gichtbühne oberhalb des Kupolofenschachtes.

Nach Freigabe durch die Füllstandskontrolle (10) im Schlagpanzer (11) des Ofens wird der Begichtungskübel über den Ofenschacht (12) verfahren und durch Öffnen der Bodenklappen in den in Betrieb befindlichen Ofen entleert.

Nach erfolgter Begichtung wird der leere Begichtungskübel automatisch in Endstellung unter den Übergabepunkt der Bandwaage (5) und der Wiegeeinrichtung (6) für Zuschlagstoffe zurückgefahren.

Füllstandskontrolleinrichtung
Zur Anzeige der Füllhöhe im Schlagpanzer des Kupolofens befindet sich am Schlagpanzer des Kupolofens eine Füllstandskontrollanzeige (10). Nach Unterschreitung der unteren Füllstandshöhe gibt ein Impuls den Begichtungsvorgang frei.

5.6.2 Futterloser Langzeit-Heißwind-Kupolofen

Kupolofen
Zum Erschmelzen der gewünschten Gußqualitäten wird ein wassergekühlter Langzeitofen (12) eingesetzt, der geeignet ist, ohne zwischenzeitliche Herdreparatur im 3-schichtigen Betrieb Ofenreisen (Standzeiten) von 6 oder mehr Wochen zu erzielen. Der Kupolofen besteht im wesentlichen aus dem wassergekühlten Ofenschacht mit erweitertem Gestell (12), einem Drucksiphon (13), dem Heißwindring mit Düsenstöcken (14), wassergekühlten Schlagpanzern und den Ringkammern zur Gichtgasabsaugung (16).

Oberhalb der Gichtöffnung ist ein Verschlußdeckel (17) angeordnet, der während der normalen Betriebszeit geöffnet bleibt und nur zum Niederschmelzen verschlossen wird.

Betriebsdaten des Kupolofens:
Bei maximaler Schmelzleistung von 50 t/h ergeben sich folgende Betriebsdaten:

	Normalbetrieb	Anfahrbetrieb
Koksanteil (Kokssatz)	11,0 %	
C-Gehalt im Koks	90,0 %	
Verbrennungsverhältnis	40,0 %	20 %
Ofenwindmenge	30 800 Nm^3/h	
Windtemperatur	600 °C	20–600 °C
Aus der Koksverbrennung entsteht:		
Gichtgas (tr)	33 729 Nm^3/h	35 063 Nm^3/h
Wasserdampf	839 Nm^3/h	872 Nm^3/h
Gichtgas (feucht)	34 568 Nm^3/h	35 935 Nm^3/h
Gichtgastemperatur	200–120 °C	20–250 °C

Das erschmolzene Eisen verläßt den Kupolofen mit einer Temperatur von 1500 bis 1580 °C in der dem Schmelzprogramm entsprechenden chemischen Zusammensetzung. Das Eisen wird über Eisenrinnen den Warmhalteöfen zugeführt.

Die stündlich abzuführende Wärmemenge von ca. 7 325 000 kJ/h wird einem Verdampfungskühler (61) zugeführt.

Gichtgas
Bei der Verbrennung des im Schmelzkoks enthaltenen Kohlenstoffes zu Kohlendioxid (CO_2) entsteht ein Verbrennungsgas, welches das oberhalb der Schmelzzone im Ofenschacht befindliche Einsatzmaterial durchströmt und dabei vorwärmt.

Oberhalb der Schmelzzone findet eine Reduktion des CO_2 zu Kohlenmonoxid CO im Gichtgas statt. Das entstehende Gichtgas besteht hauptsächlich aus Stickstoff, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Schwefeldioxid und Wasser. Das abgesaugte Gichtgas wird nachverbrannt.

Gichtgasanalyse:

Bestandteile	Normalbetrieb	Anfahrbetrieb
N_2	71,00 %	67,50 %
CO_2	10,50 %	6,00 %
CO	16,00 %	24,00 %
H_2O	2,50 %	2,50 %
SO_2	n. b.	n. b.

Das unterhalb der Gichtöffnung abgesaugte Gichtgas (21) verläßt den Kupolofen mit einer Temperatur von ca. 200–250 °C im Normalbetrieb.

Das oberhalb der Gichtgasabsaugung im Schlagpanzer (11) befindliche Einsatzmaterial dient in Verbindung mit einer Absaugedruckregelung als Verschluß gegen das Austreten von Gichtgas bzw. gegen das Absaugen atmosphärischer Luft.

Während der **Niederschmelzperiode**, wenn sich kein Einsatzmaterial mehr im Schlagpanzer befindet, wird ein Gichtverschlußdeckel (17) auf die Gichtöffnung abgesenkt, so daß auch in dieser Phase die vollständige Absaugung der Gichtgase gewährleistet ist. Der Kupolofen kann also in jeder Betriebsphase rauchfrei betrieben werden.

Stäube
Auf dem Weg durch den Ofenschacht werden mit dem Gichtgas Verbrennungsrückstände aus der Koksverbrennung, dem Einsatzmaterial anhaftende Stäube bzw. durch den Schmelzprozeß bedingte Elemente sowie staubförmiger Kalkstein aus den Zuschlagstoffen ausgetragen. Der Staubgehalt des Gichtgases beim Verlassen des Ofens beträgt vor dem Filter bis zu 20 g/Nm^3, abhängig von der Art des verwendeten Einsatzmaterials.

Schlacke
Die beim Schmelzprozeß entstehende Schlacke wird unmittelbar nach Verlassen des Siphons mit Wasser granuliert, wenn ein Abnehmer für die Schlacken gefunden ist (19) und in ein Sammelbecken (22) geleitet. Von dort aus wird das Granulat in zwei Drainagesilos gepumpt und entwässert. Das entwässerte Granulat wird zum Abtransport in Lkws entleert.

Das zum Granulieren verbrauchte aufgewärmte Wasser (28) wird vom Drainagesilo bzw. Granulatsammelbecken (22) in ein Warmwasserbecken (22a) gepumpt. Aus diesem wird es über einen Kühlturm (61) zurück zur Granulation gepumpt und gelangt mit dem Granulat wieder in das Sammelbecken (22).

Die Schlackenzusammensetzung ist vom Einsatzmaterial und der Fahrweise der Anlage abhängig. Schlackenanalysen sind im Kapitel 6 aufgeführt.

Spezifische Daten:

Granulatwassermenge	130 m^3/h
Schlackenmenge ca.	3 500 kg/h
Schlackenwärme ca.	2 093 kJ/kg
Spez. Granulierwassermenge	ca. 40 m^3/t Schlacke
Vorlauftemperatur	30 °C
Rücklauftemperatur	40–50 °C

5.6.3 Kühlwasserkreislauf

Für die Kühlung der Blasformen (15) steht ein separater Kühlwasserkreislauf (25) zur Verfügung. Das kalte Wasser wird mittels Kreiselpumpe zu den Blasformen gefördert und nach seiner Erwärmung in einer gemeinsamen Leitung zur Rückkühlung einem Konvektionskühler zugeführt. Das rückgekühlte Wasser fließt zurück zu den Pumpen. Um Leckverluste auszugleichen, ist ein Ausgleichsbehälter installiert. Die durch den Konvektionskühler erwärmte Luft wird zur Beheizung der Schrotthalle genutzt.

Ein weiteres Kreislaufsystem (26) ist für die Kühlung des Ofenmantels (12) und des Schlagpanzers (11) vorgesehen. Das Kühlwasser gelangt mittels Kreiselpumpe aus einem Vorlaufbecken (26a) zu Verteilern für die Zuführung auf die am Schlagpanzer und Ofenmantel angeordneten Spritzringe. Das Kühlwasser wird in Wassertassen aufgefangen und im natürlichen Gefälle in ein Warmwasservorlaufbecken (26b) geleitet. Von dort wird es mit einer Kreiselpumpe zur Rückkühlung in Verdampfungskühler (26c) gefördert und fließt von dort zurück in das Kaltwasser-Vorlaufbecken (26a). Der Verdampfungsverlust wird über die Werkswassereinspeisung (27) ersetzt. Das Überlaufwasser aus dem Becken fließt in den vorhandenen Werkswasser-Rückkühlkreislauf. Durch diese Anordnung wird gewährleistet, daß kein Wasser in die Kanalisation gelangt.

Betriebsdaten (Normalbetrieb):
Kühlwasserkreislaufmenge:

– für Kühlung der Blasformen	160 m^3/h
– für Ofenmantel u. Schlagpanzer	286 m^3/h
– für Schlackengranulation	80 m^3/h

5.6.4 Rekuperator

Das im Kupolofen erzeugte Gichtgas (21) gelangt über eine Gichtgasleitung in den dem Rekuperator vorgeschalteten Feuerraum (30). Am Eintritt des Feuerraumes wird das CO-haltige Gichtgas mit einem erdgasgefeuerten Zündbrenner gezündet und bei Zugabe von Verbrennungsluft (31) verbrannt. Die groben Stäube werden vorher in **Staubsäcken** (29) abgeschieden.

Der Verbrennungsgasstrom (32) wird dem Rekuperator (33) zur Heißwinderzeugung zugeführt. Der nicht benötigte Verbrennungsgasanteil wird über eine Bypassleitung (34) direkt vom Feuerraum (30) in die Abgasleitung (35) geführt. In der Abgasleitung (35) strömt nun das gesamte Abgas (35 A), bestehend aus den Verbrennungsgasen, aus Gichtgas und Erdgas sowie der zugeführten sekundären Verbrennungsluft. Die Regelung geschieht über Regelklappen, die in Abhängigkeit von der Heißwindtemperatur gesteuert werden.

Das dem Rekuperator zugeführte Verbrennungsgas (32) wird mittels Sekundärluft (36) auf eine Eintrittstemperatur von 850 °C eingestellt. Das Verbrennungsgas wird in den Rohren des Rekuperators von oben nach unten geführt und erwärmt hierbei den im Gegenstrom um die Rohre geführten zu erwärmenden Ofenwind (37).

Zur Reinigung der Innenseite der Rohre wird der von dem Verbrennungsgas mitgeführte und zum Teil an den Rohrinnenwänden abgesetzte Staub mit einer Kugelabreinigung freigehalten.

Zum Vorwärmen des Feuerraumes vor dem Schmelzbeginn oder bei Störungen des Schmelzbetriebes oder bei zu geringem CO-Anteil im Gichtgas zur sicheren Verbrennung ist ein Zusatzbrenner (38) vorgesehen, der seine Verbrennungsluft von einem Ventilator erhält.

Ein Zündbrenner (49) gewährleistet während aller Betriebsphasen die sichere Zündung der Brenngase.

Betriebsdaten:

Abgasmenge max.	98 000	Nm^3/h
Abgastemperatur max.	625	°C
Abgasanalyse:	74–78	N_2 %
	12–16	CO_2 %
	5–12	O_2 %
	1–2	H_2O %

5.6.5 Filteranlagen

Die Abgase aus der Gichtgasverbrennung werden in eine Gewebefilteranlage (46) geleitet. Um in allen Betriebsbereichen die maximal zulässige Beriebstemperatur des Filtermaterials nicht zu überschreiten, ist dem Gewebefilter ein Wärmetauscher (47) vorgeschaltet, der die Abgase im Bedarfsfall mit Luft (65) auf die Betriebstemperatur zwischen 130–150 °C abkühlt.

Der im Gewebefilter abgeschiedene Staub wird pneumatisch in ein Staubsilo (48) transportiert. Die Förderluft wird in einem Siloaufsatzfilter (56) gereinigt. Aus dem Silo kann der Staub über einen Doppelwellenmischer (49) zur Wiederverwertung verladen werden. Das im Filter gereinigte Abgas wird über zwei geregelte Saugzuggebläse (51) in die Atmosphäre abgeleitet.

Technische Daten der Filteranlage:

Gasmenge	103 075	Nm^3/h max.
Gastemperatur	130–150	°C
Filterfläche	2 400	m^2
Filtermaterial	Polyester-Nadelfilz	
Rohgasstaubgehalt	20	g/Nm^3
Reingasstaubgehalt max.	20	mg/Nm^3

5.6.6 Absaugung (Rinnenofenanlage)

Die dem Kupolofen nachgeschalteten Induktions-Rinnenöfen (20a + 20b) werden zur Vermeidung von Staubemissionen ebenso wie die 4 geplanten Induktions-Tiegelöfen (52) mit einer Absaugung versehen. Die abgesaugten Gase (62 + 67) werden über ein Leitungssystem durch einen Saugzugventilator (53) über einen Vorabscheider (54) einem Gewebeentstauber (55) zugeführt und gereinigt in die Atmosphäre abgegeben. Der abgeschiedene Staub wird in Big Bags verpackt und der Wiederverwendung zugeführt.

Technische Daten:

– Induktions-Rinnenöfen		
Absaugleistung	2 × 10 000	Nm^3/h
– Tiegelöfen		
Absaugleistung	2 × 30 000	Nm^3/h
– Flüssigeisenrinnen	30 000	Nm^3/h
– Gewebefilter		
Gasmenge	110000	Nm^3/h

6 Bilanzierung der Stoffströme

Die Bilanzierung der Einsatzstoffe, Hilfsstoffe, Energien und deren Umwandlung in Flüssigeisen als Produkt und der Reststoffe/Abfälle gibt einen Überblick über die Stoffflüsse der Gesamtanlage. Aus der systematischen Darstellung werden Ansatzpunkte zur Vermeidung und Verwertung sowie zur Entfrachtung der Abfälle/Reststoffe von Schadstoffen aufgezeigt.

In der durchgeführten Betrachtung wurde die gesamte Kupolofen-Schmelzanlage als Bilanzraum von den angrenzenden Anlagen der Gesamtgießerei abgegrenzt. Die Einsatzstoffe und deren Mengen liegen detaillierter vor als die Reststoffe. Dies liegt an der vorrangigen Aufgabe des Anlagenbetriebes, möglichst wirtschaftlich und termingerecht die verschiedenen Gußsorten der Gießerei zur Verfügung zu stellen. Die Aufmerksamkeit richtet sich auf die detailliertere Abfall-/Reststoffbetrachtung aus der Erkenntnis, daß die Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage auch durch die Entsorgungskosten beeinflußt wird.

Die Stoffströme für den in Kapitel 5 beschriebenen Betrieb sind in der **Abbildung 6-1** im Überblick dargestellt. In den **Tabellen 6-1 und 6-3** sind die Einsatzstoffe und Abfälle/Reststoffe des Bilanzraums für 1990 aufgeführt. In der Einsatzstoff-Tabelle 6-1 sind neben den Einsatz- und Hilfsstoffen auch deren Einsatzmengen pro Tonne Gußeisenprodukt angegeben.

In der Abfall-/Reststoff-Tabelle 6-3 sind alle entstehenden festen Abfallarten aufgeführt. Zur Bezeichnung der Abfälle wird auf die Nomenklatur des Abfallartenkatalogs der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA; Stand 1991) zurückgegriffen sowie der Abfallschlüssel angegeben. Bei Abfällen, die in der Abfallbestimmungsverordnung (AbfBestV) genannt sind, den sogenannten besonders überwachungsbedürftigen Abfällen, wird der in der TA-Abfall vorgesehene Entsorgungsweg genannt. Weiter sind in der Tabelle Angaben zur Herkunft und Zusammensetzung und zu den spezifischen Mengen der Abfall-/Reststoffströme aufgeführt.

Die Anlage erzeugt 50 t Flüssigeisen/h im 3-Schicht-Betrieb. Insgesamt werden ca. 180 000 t Flüssigeisen/Jahr in der Anlage erschmolzen, wovon etwa 100 000 t guter Guß in die Produktion von Gußteilen eingehen. Die nachfolgende **Abbildung 6-1** stellt die Stoffflüsse in der Gesamtanlage prinzipiell dar.

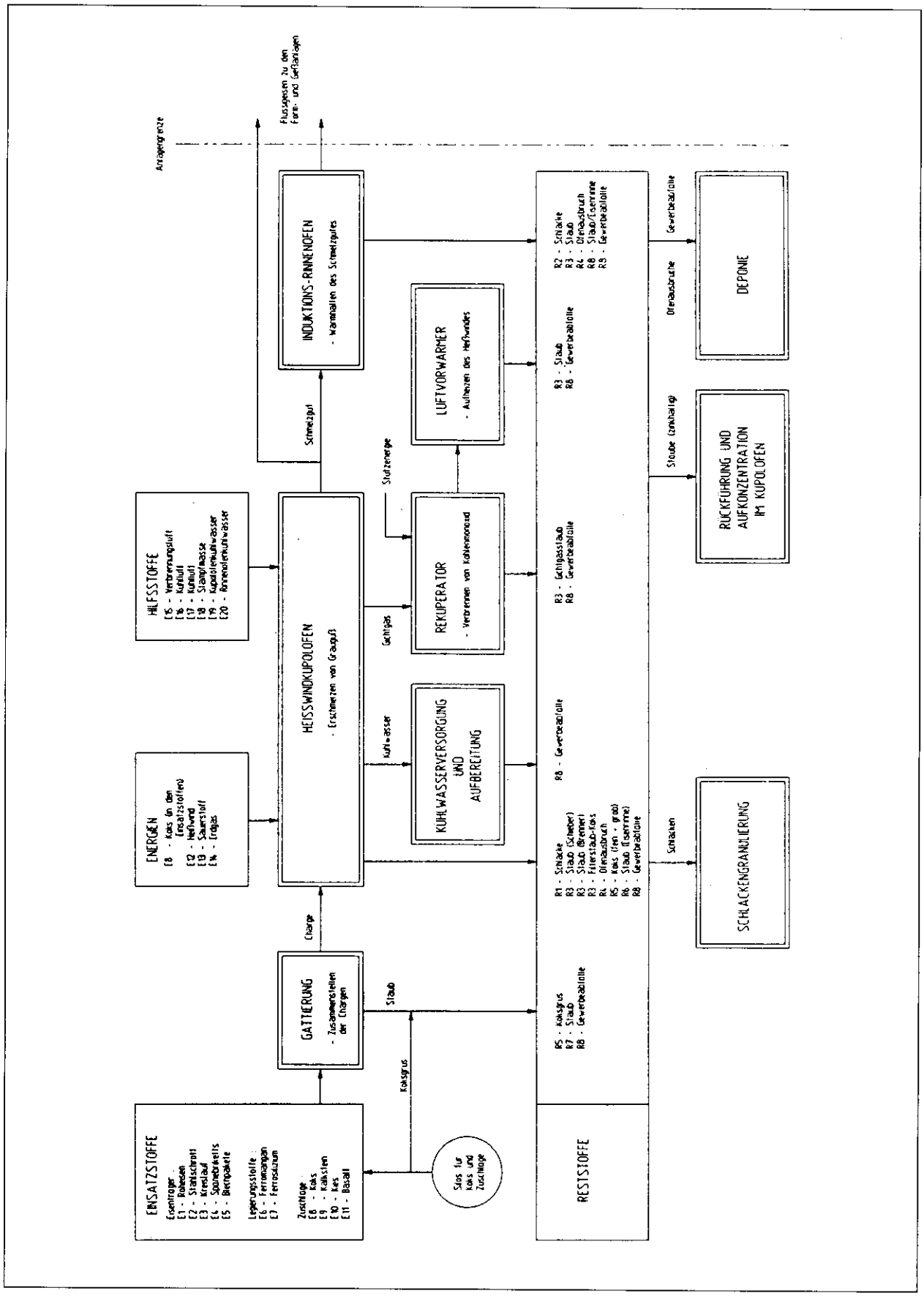


Abb. 6-1: Prinzipielles Stoffflußbild der Heißwind-Kupolofen-Schmelzanlage

Einsatzstoffe
Als Einsatzstoffe werden Eisenträger, Legierungsbestandteile, Schmelzzuschläge sowie Verbrennungsmedien und Hilfsstoffe bezeichnet.

Einsatz-stoff-nummer	Bezeichnung	spezifische Mengen bezogen auf eine Tonne Gußeisen	Entstehende Reststoffe
	EISENTRÄGER		
E 1	Roheisen	0–300 kg/t	R1, R2, R3, R6
E 2	Stahlschrott	200–400 kg/t	R1, R2, R3, R6
E 3	Kreislauf	400–1000 kg/t	R1, R2, R3, R6
E 4	Spänebriketts	0–100 kg/t	R1, R2, R3, R6
E 5	Blechpakete	0–700 kg/t	R1, R2, R3, R6
	LEGIERUNGSSTOFFE		
E 6	Ferromangan	0–14 kg/t	R1, R2, R3, R6
E 7	Ferrosilizium	0–85 kg/t	R1, R2, R3, R6
	ZUSCHLÄGE		
E 8	Koks	90–140 kg/t	R1, R2, R3, R5, R7
E 9	Kalkstein	0–50 kg/t	R1, R2, R3
E 10	Kies	0–50 kg/t	R1, R2, R3
E 11	Basalt	0–50 kg/t	R1, R2, R3
	VERBRENNUNGSMEDIEN / HILFSSTOFFE		
E 12	Heißwind	680 Nm^3/t	Keine (gasf. Gichtgasanteil)
E 13	Sauerstoff	34 Nm^3/t	Keine (gasf. Gichtgasanteil)
E 14	Erdgas (Zusatz- und Stützbrenner)	9 Nm^3/t	Keine (gasf. Gichtgasanteil)
E 15	Verbrennungsluft (primär + sekundär)	135 Nm^3/t	Keine (gasf. Gichtgasanteil)
E 16	Kühlluft zum Rückkühler	2 000 Nm^3/t	Keine (Atmosphäre)
E 17	Kühlluft für Wärmetauscher	3 400 Nm^3/t	Keine (Atmosphäre)
E 18	Stampfmassen	6 kg/t	R1, R2, R4
E 19	Kühlwasser für Kupolöfen	250 l/t	Keine (Vorfluter)
E 20	Kühlwasservorlauf zu Induktions-Rinnenöfen	660 l/t	Keine (Vorfluter)

Tab. 6-1: Einsatzstoffe und -mengen wie Eisenträger, Legierungsbestandteile, Zuschläge, Verbrennungsmedien und Hilfsstoffe für den Normalbetrieb der untersuchten Kupolofen-Schmelzanlage
(R1 = Kupolofenschlacke; R2 =-Rinnenofenschlacke, R3 = Gichtgasstaub; R4 = Ofenausbruch; R5 = Koksgrus; R6 = Rinnenofenstaub; R7 = Staub von Koksförderbändern)

Ein Teil der festen Einsatzstoffe geht nach seiner Umwandlung in der Regel in die Reststoffe ein.

Die **Einsatzstoffe E 1 bis E 5** dienen als Eisenträger. Durch die Eisenträger werden die folgenden Schmelzkomponenten in den Kupolofen eingebracht. Aus der nachfolgenden Tabelle sind die Anteile der einzelnen Komponenten ersichtlich.

Komponenten	Minimal %	Maximal %
Eisen	90	96
Kohlenstoff	0,1	4
Silizium	0,1	4,4
Schwefel	0,004	0,3
Mangan	0,1	1,0
Phosphor	0,05	0,1
Chrom	0,03	0,1
Zink	0	1,5

Tab. 6-2: Wesentliche Eisenträger zur Erzeugung des Gußeisens

Die **Einsatzstoffe E 6 bis E 11** dienen der Wärmezufuhr (Koks), der Ausgleichung des Schmelzgutes (Ferrosilizium) und als Schmelzhilfsmittel (Kalkstein).

Die **Einsatzstoffe E 12 bis E 20** dienen der Aufrechterhaltung der verfahrensmetallurgischen Verbrennungsprozesse und der Kühlung des Kupolofens. Ofenausmauerungsmaterialien schützen die Ofenwand vor dem Erhitzungsdurchbruch und unterstützen die Schlackenarbeit. Diese gasförmigen (Außenluft) und flüssigen (Kühlwasser) Einsatzstoffe tragen nur unwesentlich zur Reststoffbildung bei und werden deshalb nachfolgend nicht erläutert.

Einsatzstoffe – Erläuterungen zu Tabelle 6-1

E 1 Roheisen: Es werden bis zu 150 kg Roheisen/t Gußeisen in Form von Roheisen-Masseln eingesetzt. Masseln sind trapez- oder plattenförmige gekerbte oder ungekerbte Eisenblöcke mit Gewichten von einigen bis 30 kg. Die **Roheisen-Masseln** werden im Hochofen aus Eisenerz hergestellt. Sie haben eine bekannte Analyse und wenig störende Begleitelemente. Heißwind-Kupolöfen werden selten mit größeren Mengen von Roheisen betrieben, weil das Flüssigeisen auch ohne die relativ teuren Masseln durch Aufkohlung von Schrott hergestellt werden kann.

E 2 Stahlschrott: Dem Stahlschrott sind außerdem Schienenschrott, Konstruktionsschrott und die Stanzabfälle zugeordnet. Der **Stahlschrott** wird sortiert vom Handel angeboten. Der **Schienenschrott** mit höherem Mangananteil ist für die Herstellung von Temperguß geeignet. Der **Konstruktionsschrott**, der aus Abfällen von Profilen und Blechen besteht, wird als Einsatzstoff für Kugelgraphitguß verwendet. Der von der weiterverarbeitenden Industrie als **Stanzabfall** abgegebene Schrott mit bekannter Analyse ist für die Herstellung von Sicherheitsteilen geeignet.

E 3 Kreislaufmaterial: Die Kreislaufmaterialien sind Reste aus dem Gießen und der spanenden Bearbeitung. Sie stammen zum größten Teil aus anderen Anlagenteilen des Unternehmens. Ein großer Teil sind Gießereireste wie Angüsse, Angußkanäle und Ausschuß.

E 4 Spänebriketts: Die Späne fallen ebenfalls im eigenen Unternehmen bei der spanenden Bearbeitung an. Die Späne werden in kaltem Zustand bei hohem Druck brikettiert und in Anteilen bis 20 % der Gattierung zugegeben.

E 5 Blechpakete: Zunehmend werden verpreßte Blechpakete aus der Automobilindustrie eingesetzt. Der Zinkanteil am Schrott liegt in der Größenordnung von 10 kg/t. Negative Auswirkungen von Zink und deren Begleiter auf das zu erzeugende Gußeisen sind nicht festgestellt worden. Die Blechpakete, die aus dem Abfallblech bei der Herstellung von Karosserien anfallen, sind ein hochwertiger Einsatzstoff mit niedrigem Mangangehalt, der für die Herstellung von Sphäroguß geeignet ist.

E 6 Ferromangan: Ferromangan wird meist in Hochöfen erzeugt und stückig angeliefert. Mangan hat eine relativ hohe Schwefelaffinität und bindet in Metallschmelzen den vorhandenen Schwefel als Sulfid. Bei der Herstellung von Gußeisen mit Lamellengraphit und Temperguß wird der Mangangehalt durch Zugabe von Ferromangan so eingestellt, daß er zur Bindung des Schwefels als Mangansulfid ausreicht. Das Mangansulfid bleibt größtenteils im Eisengefüge.

E 7 Ferrosilizium: Ferrosilizium dient der Einstellung des erforderlichen Siliziumgehaltes im Gußeisen. Ferrosilizium wird entsprechend der Analysenvorschrift und dem Stahlschrottanteil aufgegeben. Zum Einsatz kommen außerdem SiC-Formlinge mit Zement als Binder.

E 8 Koks: Der als Energieträger verwendete Koks dient auch gleichzeitig als tragende Säule für die Beschickung. Im unteren Teil des Schachts gibt der weißglühende Koks beim Kontakt mit den flüssigen Eisentropfen Kohlenstoff und Schwefel an das Eisen ab. Der für den Einsatz im Kupolofen besonders geeignete Gießereikoks hat eine Körnung von 80–140 mm, einen Kohlenstoffgehalt von 90–91 %, einen Aschegehalt von 7–8 % und einen Schwefelgehalt von 0,6–0,7 %. Diese Werte sind auf den trockenen Koks bezogen. Die Feuchte im Anlieferungszustand ist max. 2 %. Der Aschengehalt wird aufgrund seines hohen Anteils an SiO_2 (40 bis 50 %) auch als saure Gangart bezeichnet. Die restlichen Bestandteile sind 27 bis 40 % Al_2O_3, 8 bis 14 % Fe_2O_3, 4 % CaO und 2,5 % MgO. Der Begriff Kokssatz beschreibt das Verhältnis der eingesetzten Koksmenge in kg, bezogen auf 100 kg flüssiges Eisen.

E 9 Kalkstein: Kalkstein wird als schlackebildender Zuschlag verwendet, der sich beim Erhitzen in Calciumoxid und Kohlendioxid zersetzt. Es ist üblich, eine Menge von Kalkstein zuzugeben, die zwischen 20 bis 35 % der Koksmenge liegt. Der Kalkstein soll eine Reinheit haben, die größer als 95 % ist. Die Körnung liegt zwischen 40–80 mm. Die saure Koksasche, der an dem Kreislauf und Schrott anhaftende Sand und der Abbrand des neutralen Futters wird durch den Kalkstein neutralisiert. Ein großer Teil der Schlacke bildet sich aus dem Kalkstein.

E 10 Kies: Der Kies wird verwendet, um die Schwankungen der Schlackenmenge auszugleichen, die sich aus dem ungleichmäßigen Zufluß von Verunreinigungen an den Einsatzstoffen ergeben. Die Kiese gehen nach ihrer Nutzung als Schmelzhilfsmittel als mineralischer Bestandteil in die Schlacke ein.

E 11 Basalt: Basalt ist ein Schmelzhilfsmittel, das saure Bestandteile aus der Eisenschmelze entfernt und geht nach seiner Nutzung als mineralischer Bestandteil in die Schlacke ein.

E 18 Stampfmassen: Mit den Stampfmassen werden die Herdausmauerungen des Kupolofens und der Rinnenöfen aufgebaut. Für den Kupolofen besteht die Stampfmasse im wesentlichen aus Aluminiumoxid Al_2O_3 (90 %) und Siliziumkarbid SiC (ca. 8 %). Für die Rinnenöfen besteht die Stampfmasse vorwiegend aus Aluminiumoxid (96 %). Die Stampfmassen werden nach Gebrauch vor allem als Ofenausbrüche entsorgt. Außerdem geht ihr Abbrand in die Schlacken und Gichtgasstäube über.

Die Einsatzstoffe **E 12** bis **E 20** außer **E 18** tragen nicht zur Reststoffentstehung bei.

Reststoffe/Abfälle - Erläuterung zur Tabelle
In der nachfolgenden **Tabelle 6-3** sind die erfaßten Reststoffe hinsichtlich des Abfallschlüssels nach LAGA, dem Aussehen, der Herkunft, der Mengen, dem Entsorgungsweg, den Entsorgungskosten und der weiteren Vermeidung dargestellt.

REST-STOFF-Nummer	RESTSTOFF-BEZEICHNUNG	ABFALL-SCHLÜSSEL	ZUSAMMENSETZUNG	TECHNOLOGISCHE DATEN (Aussehen, Farbe Aggregatzustand Wassergehalt, et	HERKUNFT (Anlagenteil oder Infrastruktur)	MENGE/JAHR (Mengen bezogen auf 100.000 t Flüssigeisen pro Jahr)	ENTSORGUNGSWEG	ENTSORGUNGSKOSTEN (DM/Jahr; DM/t)	VERMEIDUNGS- UND VERWERTUNGSWEG (intern/extern)
R 1	Kupol-Ofen-Schlacke	31202	siehe Analysen (im Text)	grau bis dunkelgrün, dunkle verschieden große Stücke	- Kupolofensiphone	6000 - 8000 t/a (60-80 kg/t)	Deponie	15,50 DM/t ca. 124.000 DM/a	Granulierung(intern) und Verwertung (extern) ist vorgesehen
R 2	Rinnen-Ofen-Schlacke	31202	keine Analyse vorhanden	dunkle verschieden große Stücke	Rinnenofen 1+2	ca. 500 t/a (ca. 5 kg/t)	Deponie	15,50 DM/t ca. 7.750 DM/a	Granulierung(intern) und Verwertung (extern) ist vorgesehen
R 3	Gichtgasstäube	31215	siehe Analysen (im Text)	braun trocken nach Befeuchtung ca. 12-14%	- Gichtgasschieber - Brennkammer - Reku - Luvo 1 - Luvo 2 - Filter - Kupolofen	600 - 1000 t/a (6 - 10 kg/t)ma	Lieferung zur Firma Berzelius Metallhüttengesellschaft mbH	ca. 200 DM/t ca. 200.000 DM/a	Aufbereitung durch Wiedereindüsung intern; Verwertung mittels Wälzrohrverfahren
R 4	Kupolofen- und Rinnenofen-Ausbrüche	31108	siehe Analyse (im Text)	dunkel, schamotteartig	- Kupolofen - Siphone - Rinnenöfen	250 t/a (ca.2,5 kg/t)	Deponie	15,50 DM/t ca. 3.875 DM/a	Vermischung mit Schlackengranulaten soll geprüft werden
R 5	Koksgrus	31101	siehe Analysen (im Text)	dunkel, staubartig	- Koksförderbänder - Filteranlagen	850 t/a (ca.8,5 kg/t)	Verwertung, Verkauf an Kokerei	Erlöse: 0,15 bis 0,5 - fache des Kokspreises	Verwertung durch externe Energienutzung
R 6	Filterstaub	31301	noch keine Analyse	staubartig	- Eisenrinnen	im Kilogrammbereich	Deponie; Zwischenlagerung im Betrieb bis zur Klärung des Entsorgungsweges	n.b.	Klärungsbedarf
R 7	Filterstaub	31301	noch keine Analyse	staubartig	- förderbänder	im Kilogrammbereich	Deponie; Zwischenlagerung im Betrieb bis zur Klärung des Entsorgungsweges	n.b.	Klärungsbedarf
R 8	Hausmülländliche Gewerbeabfälle	912	noch keine Analyse	unbekannt	von allen Stellen der Anlage	n.b.	Hausmülldeponie	ca. 50,-- DM/t	Vorgesehen ist die getrennte Sammlung

Tab. 6-3: Reststoffe – ihre Herkunft, Entsorgung sowie vorgesehene Vermeidung und Verwertung

Reststoffe – Erläuterungen zu Tabelle 6-3

R 1 Kupolofenschlacke: Die Kupolofenschlacke (Abfallschlüssel 31202) fließt kontinuierlich durch den Siphon über eine Abflußrinne in die unter dem Kupolofen bereitgestellten Behälter oder Wannen. In den Schlackenwannen erstarrt diese und wird mit einem Gabelstapler in ein offenes Zwischenlager vor der Schmelzhalle gebracht. Dort wird die Schlakke mit Wasser ausgekühlt und die feste großstückige grau-schwarze Schlacke aus dem Behälter entleert. Von hier aus werden die Schlacken auf die Deponie transportiert. Die spezifische Schlackenmenge beträgt 60 bis 80 kg Schlacke/t Flüssigeisen.

Schlackenzusammensetzung

Die Zusammensetzung der Schlacke wurde durch eine Analyse nach Aufschluß in Königswasser durchgeführt und enthält die in **Tabelle 6-4** aufgelisteten Bestandteile:

Komponenten als Oxide		Durchschnittswerte %
Silizium	SiO_2	52,0
Eisen	FeO	16,0
Mangan	MnO	2,5
Calcium	CaO	25,0
Magnesium	MgO	1,8
Blei	PbO	0,0006
Kupfer	CuO	0,003
Nickel	NiO	0,0013
Chrom	Cr_2O_3	0,005
Zink	ZnO	0,003

Tab. 6-4: Bestandteile der Kupolofenschlacke

Die Schlacken wurden nach ihrem Eluationsverhalten nach DIN 38414-S4 mit entsalztem Wasser 1:10 analysiert. Mit diesem Verfahren kann das Auswasch- oder Eluierverhalten der Schlacke, z. B. auf einer Deponie, beurteilt werden. Folgende Durchschnittswerte wurden ermittelt:

Parameter	Einheiten	Werte
pH-Wert (20 °C)		8,6
Elektrische Leitfähigkeit	µS/cm	65
Chem. Sauerstoffbedarf (CSB)	mg/l	< 15
Biochem. Sauerstoffbedarf in 5 Tagen (BSBS)	mg/l	< 2
Sulfat	mg/l	18
Zink	mg/l	0,1
Nitrat	mg/l	1,0
Ammonium, Nitrit, Phosphor, Eisen, Mangan, Blei, Kupfer, Chrom, Cadmium, Nickel	mg/l	jeweils < 0,01

Tab. 6-5: Eluationsverhalten der Kupolofenschlacke

R 2 Rinnenofenschlacken: Mit speziellen Werkzeugen wird die Rinnenofenschlacke (Abfallschlüssel 31202) abgeschlackt und deponiert. Die Rinnenofenschlacke ist eisenhaltiger als die Kupolofenschlacke. Analysen dieser Schlacke liegen noch nicht vor. Die spezifische Menge beträgt ca. 3,5–5 kg Rinnenofenschlacke/t Flüssigeisen.

R 3 Gichtgasstäube: Auf dem Weg durch den Ofenschacht werden mit dem Gichtgas Verbrennungsrückstände aus der Koksverbrennung, dem Einsatzmaterial anhaftende Stäube bzw. durch den Schmelzprozeß bedingte Elemente sowie staubförmiger Kalkstein aus den Zuschlagstoffen ausgetragen. Durch den Einsatz von Stahlblechen, die z. T. verzinkt sind, reichert sich in der Abluft ein Staub mit relativ hohem Zinkgehalt an (Abfallschlüssel 31215).

Die Anfallstellen der Stäube sind der Rekuperator, die Brennkammer, der Abgaskühler und die Filtersysteme. Insgesamt entsteht eine spezifische Gichtgasstaubmenge von ca. 11 kg pro Tonne Flüssigeisen.

Während des Untersuchungszeitraums wurde die Staubeindüsung installiert und erprobt. Ein großer Teil der aufkonzentrierten Stäube soll von einem Verwerter extern aufgearbeitet werden (Kapitel 7.3).

Zusammensetzung

Die metallischen Analysen der Stäube an den Anfallstellen sind nachfolgend zusammengestellt.

Stoffart	Schieber %	Brennkammer %	Reku %	Luvo %	Filteranlage %
Magnesium	0,270	0,258	0,200	0,382	0,378
Kupfer	0,000	0,000	0,016	0,027	0,036
Zink	23,320	9,810	8,746	25,160	30,190
Eisen	6,330	5,235	–	30,490	9,610
Blei	0,280	0,008	0,024	0,019	0,070
Rest	Nichtmetallische und nicht untersuchte andere Bestandteile der Stäube				

Tab. 6-6: Metallische Anteile der Gichtgasstäube

Untersuchungen über das Eluierverhalten der Stäube liegen lediglich von der stillgelegten Schmelzerei I und der Schmelzerei II vor. Es ist jedoch davon auszugehen, daß die Staubzusammensetzungen der neuen Schmelzerei den vorliegenden Analysen ähnlich sind.

R 4 Ofenausbruch: Bei der Erneuerung der Ofenbodenausmauerung des Kupolofens und der Ausmauerungen der Rinnenöfen sowie der Siphone entstehen etwa 1–2 t Ofenausbrüche/Woche. Die Haltezeit der Stampfmasse im Kupolofenboden beträgt ca. 12 Wochen. Die der Rinnenöfen sogar Jahre und die Siphone ca. 20 Tage. Die Zusammensetzungen der Stampfmassen aus Kupol- und Rinnenöfen ist bei den Einsatzstoffen aufgeführt. Die Ofenausbrüche werden auf Deponien abgelagert. Aufgrund der geringen Mengen und der Unsicherheiten bezüglich der Zusammensetzungen im Ofenausbruch ist keine Aufbereitung und Verwertung vorgesehen.

R 5 Koksgrus: Bei der Gattierung und dem Transport entsteht durch Abrieb Koksgrus. Koksgrus sind Koksteilchen mit einer Korngröße < 10 mm. Diese werden über der Gattierung abgesaugt und an den Förderrinnen abgesiebt. Die abgesaugten Koksreste, die auch mit Stäuben der Zuschläge vermischt sind, fallen in den Gewebefiltern der Abluftreinigungsanlage an.

Im Verlauf eines Produktionsjahres müssen etwa 850 t Koks grob und fein entsorgt werden. Der Koksgrus besteht zu etwa 85 % aus Kohlenstoff. Die Koksgruse werden in Big Bags abgefüllt und einem externen Verwerter zur energetischen Nutzung überlassen.

R 6 Staub aus den Rinnnenöfen: Der Staub aus den Eisenrinnen wird kontinuierlich abgesaugt und den Filteranlagen zugeführt. Die genaue Menge ist nicht ermittelt. Die Zusammensetzung muß noch analysiert werden. Laut Angaben des Betreibers ist diese Menge sehr gering und liegt unterhalb einer Tonne pro Jahr. Im Untersuchungszeitraum wurde der Staub zwischengelagert; interne und externe Verwerter werden gesucht.

R 7 Staub von den Koksförderbändern: Bei dem Transport des Kokses und den Zuschlägen vom Vorratssilo zur Gattierung entsteht durch Abrieb ein Koksstaubgemisch. Dieses wird den Förderbandhäusern abgesaugt und fällt in den Gewebefiltern der Abluftreinigungsanlage an. Die Menge war zum Zeitpunkt der Erhebung noch nicht bekannt. Die Zusammensetzung des Koks-Staub-Gemisches muß noch untersucht werden. Dieser Reststoff wird mit anderen Stäuben deponiert, soweit er nicht mit dem Koksgrus zusammen zur Verwertung bereitgestellt wird.

Produkt

Das Produkt der Kupolofen-Schmelzanlage ist Flüssigeisen. Nachfolgend ist die typische Zusammensetzung des Flüssigeisens aus dem Kupolofen dargestellt.

Stoffkomponente		Minimalwert %	Maximalwert %
Eisen	Fe	91,6	93,0
Kohlenstoff	C	2,5	4,0
Silizium	Si	0,6	4,0
Schwefel	S	0,06	0,3
Phosphor	P	0,05	0,2
Mangan	Mn	0,1	0,8
Chrom	Cr	0,03	0,15
Zink	Zn	0	0,1
Molybdän	Mo	0	1,5
Kupfer	Cu	0	0,6

Tab. 6-7: Zusammensetzung des Flüssigeisens aus dem Kupolofen

Teil C – Betriebsbezogene Konzepte zur Vermeidung und Verwertung von Abfällen/Reststoffen

7 Bereits durchgeführte Maßnahmen zur Vermeidung und Verwertung von Abfällen/Reststoffen

Im untersuchten Betrieb können die Abfälle/Reststoffe nicht vollständig vermieden, sondern nur vermindert werden. Ihr Entstehen ist durch die Art der Produktion bedingt. Die nach den Verminderungsmaßnahmen verbleibenden Schlacken, Koksstäube und zinkhaltigen Gichtgasstäube sind vollständig wiederverwertbar. Für die sonstigen Stäube und Ofenausbrüche ist die Verwertung nur bedingt möglich.

In den folgenden Abschnitten werden die vom Betrieb bereits durchgeführten Maßnahmen für den untersuchten Kupolofen-Schmelzbetrieb geschildert.

7.1 Vermeidung durch den Ersatz veralteter Kupolöfen durch einen futterlosen Langzeit-Heißwind-Kupolofen

Einige Monate vor der betrieblichen Reststoffuntersuchung wurde ein futterloser Langzeit-Heißwindkupolofen mit Wasserkühlung in Betrieb genommen. Dieser ersetzt die veralteten konventionellen Heißwind-Kupolöfen der bisherigen Schmelzerei I und II. Die neue Schmelzanlage ist in Kapitel 5.6 beschrieben.

Durch den futterlosen Ofenaufbau werden im wesentlichen die Ofenausbrüche zwischen 70 bis 80 % vermieden; nur der Ofenboden wird ausgemauert. Außerdem verringert sich die Schlackenmenge um schätzungsweise 5 bis 15 %, bedingt durch den geringeren Abbrand, verringerten Kokseinsatz und die optimale Fahrweise des Ofens. Letztlich erzeugt dieser energiewirtschaftlich optimierte Ofen ebenfalls weniger Gichtgasstäube, sonstige Stäube und Koksgrus.

7.2 Verwertung der Kupolofenschlacken durch Aufbereitung

Die Aufbereitung der Kupolofen- als auch der Rinnenofenschlacken in Form von gleichmäßigen Schlackenkörnern mit einer Korngröße zwischen 8 bis 16 mm ist die Voraussetzung zur Verwertung. Der untersuchte Betrieb sieht dafür die Granulierung (naß) oder die Zerkleinerung (trocken) vor. Die Entscheidung für das eine oder andere Verfahren hängt im wesentlichen von der Verkaufsfähigkeit der Granulate und den Kosten der Aufbereitung ab.

7.2.1 Aufbereitung der Schlacken durch nasse Granulierung

Die nasse Granulierung der noch schmelzflüssigen Schlacke wird im Betrieb selbst erfolgen. Dafür wird die flüssige Schlacke nach ihrem Abzug über den Schlackensiphon direkt auf eine Rinne geleitet, die mit einem kontinuierlichen Wasserstrahl versorgt wird. Durch die Berührung mit dem Wasser und einer heftigen Vermischung im Granuliertrichter granuliert die Schlacke zu kleinen Stückgrößen aus.

Die Schlackendichte verringert sich dabei gegenüber etwa 2,7 t/m^3 bei der trockenen Erstarrung auf etwa 1,2 bis 1,3 t/m^3 bei den nassen Verfahren aufgrund der porösen Struktur der naß abgeschreckten Schlacken. Dies kann von Nachteil sein, wenn die Schlackengranulate im

Straßenunterbau oder bei anderen baulichen Maßnahmen Einsatz finden sollen, bei denen Festigkeit der Baustoffe verlangt wird. Deshalb ist die in dieser Art granulierte Schlacke möglicherweise auch in der Glas- oder Isolierwollindustrie, für Sportplatzuntergrund oder als Mischschlacke verwertbar.

Ende 1991 wurde die Granulieranlage probegefahren. Die Anlage wird betrieben, sobald Granulatabnehmer gefunden sind.

7.2.2 Aufbereitung der Schlacken durch Zerkleinerung

Die Schlacke liegt derzeit nach dem Erstarren in Wannen in sehr unterschiedlichen Größen vor. In diesem Zustand ist die Schlacke nicht verwendbar.

Weil die Granulate aus der eigenen Granulieranlage nicht absetzbar sind, nahm der Betrieb Kontakt zu Baustoffirmen auf. Diese wollen die Schlacken annehmen und mechanisch in Brechern zerkleinern. Hindernisse sind die behördliche Zulassung der Zerkleinerungsanlage und die Genehmigung zum Wiedereinsatz der zerkleinerten Schlacken im Straßenbau oder ähnlichen Einsatzbereichen.

Die Kosten der Zerkleinerung werden etwa das 2- bis 3-fache über der Deponierung betragen, also zwischen 30–60 DM/t. Hinzu kommen die Transportkostenerhöhungen durch größere Entfernungen zum Verwerter als zur Deponie.

Die trocken zerkleinerten Granulate haben eine höhere Festigkeit. Außerdem sind die trockenen Verfahren bezüglich weiteren Emissionen (Gasbildung) und zusätzlichem Reststoffanfall (Abwasser) günstiger einzustufen. Von Nachteil ist der hohe Energieaufwand beim Einsatz von mechanischen Zerkleinerungsaggregaten sowie der Transportaufwand der Schlacken zum Aufbereiter.

7.3 Aufkonzentration der zinkhaltigen Gichtgasstäube durch Wiedereindüsung

Die Kupolofenanlage wurde so gebaut, daß der Einsatz von zinkhaltigen Blechpaketen aus der Automobilindustrie im Kupolofen möglich ist. Die Gichtgasstäube enthalten deshalb außer einem hohen Zinkanteil (8 bis 15 %) ebenfalls noch beträchtliche Mengen an Eisenoxid im Bereich zwischen 8 bis 15 %. Die Stäube werden von den Entnahmestellen in der Gichtgasentstaubung über Rohrleitungen zu einem Silo transportiert.

Die Gichtgasstäube werden von den Staubsilos durch spezielle Eindüsungstechnologien in den Kupolofen eingesaugt. Mit dieser Maßnahme wird der Zinkgehalt der Stäube aufkonzentriert. Die Eindüsungstechnologie ist installiert und seit Mitte 1991 in Betrieb, wodurch sämtliche Gichtgasstäube der Aufbereitung und Wiederverwendung zugeführt werden.

Da Zink bereits bei einer geringeren Temperatur als der Schmelztemperatur zu verdampfen beginnt, ist der größte Teil des Zinks wieder in den abkondensierten Stäuben zu finden. Geklärt werden muß noch die mögliche Produktbeeinflussung durch die Windeindüsung oder Wiedereindüsung der zinkhaltigen Stäube. Bereits nach den ersten Wiedereindüsungsversuchen wurden Werte um 30–40 % Zinkgehalt in den Stäuben erreicht. Die ersten Ergebnisse aus der Zinkeindüsung in den Kupolofen sollen bis Anfang 1992 vorliegen. Geklärt werden müssen noch Fragen der Förderoptimierung des Zinkstaubes in den Kupolofen.

Erwogen wird dabei auch die Eindüsung eines Gichtgasstaub-Kohlenstaub-Gemisches in den Ofenraum. Dadurch kann direkt auf die Analyse bzw. die Zusammensetzung der Schmelze durch Zugabe bestimmter staubförmiger Einsatzstoffe Einfluß genommen werden. Ein weiterer

Vorteil für das Kohlenstaubgemisch anstelle von Stückkoks ist die sehr schnelle Anpassung der Schmelzenzusammensetzung und damit Einfluß auf die Produktqualität.

Die Aufbereitung und Trennung der Zinkanteile von den anderen Bestandteilen, erfolgt durch das Wälzverfahren in einem externen Fachbetrieb (siehe Kapitel 4.3.3.2). Ab einem Zinkgehalt über 16 % und Einhaltung bestimmter Staubzusammensetzungen wird die Aufbereitung des Zinks vom Aufbereiter wirtschaftlich vorgenommen. Der Betrieb bezahlt etwa 200 DM/t Gichtgasstaub an den Verwerter für Transport und Aufbereitung.

7.4 Verwertung von Koksgrus bzw. Koksstäuben

Für den Koksgrus von den Förderbändern und den Koksruß ist bereits ein Abnehmer gefunden. Dieser setzt den brennstoffreichen Stoff in seiner energieerzeugenden Anlage ein. Der Koksgrus muß in Big Bags abgefüllt beim Verwerter angeliefert werden. Ein weiterer Aufbereitungsaufwand ist nicht erforderlich.

Der Verwerter düst den Koksgrus ein. Genauso ist die Brikettierung der kohlenstaubartigen Koksgruse möglich.

Durch die Abgabe entsteht für den Betrieb eine Erlössituation. Die Koksgruse erzielen eine Gutschrift in Höhe von ca. 15 % des Einkaufspreises des Kupolofenkokses liegt. Der zweite Gewinn ergibt sich durch den Wegfall der Deponierungskosten.

Der Betrieb hat alternativ die Wiedereindüsung der Koksgruse zusammen mit den sonstigen Stäuben geprüft. Dazu mußten Koksgruse und Stäube vermischt und verpreßt werden, wenn sie nicht eindüsbar sind. Die Maßnahme erfordert jedoch Investitionskosten zum Vermischen, Verpressen oder Wiedereindüsen, weshalb sie nur im Falle eines Entsorgungsengpasses zum Zuge käme.

7.5 Vermeidung von Reststoffen durch Energieeinsatzoptimierung

Mit dem neuen Langzeit-Kupolofen wurde auch eine moderne EDV-gestützte Steuer- und Leittechnik in Betrieb genommen. Diese optimiert den Betrieb und verringert somit die Menge an einzusetzenden Brennstoffen, vor allem an Koks. Der Abbrand der eingesetzten Stoffe wird verringert. Dadurch verringert sich der Anfall aller Reststoffe im Kupolofen zusätzlich um schätzungsweise 1 bis 5 % gegenüber den bisher betriebenen konventionellen Heißwindkupolöfen.

7.6 Reststoffentstehung durch emissionsmindernde Maßnahmen

Die emissionsmindernden Maßnahmen leiten sich aus den Anforderungen der Umweltschutzgesetzgebung (TA Luft) ab. Anstelle des Entsorgungspfades Atmosphäre fallen bei allen Abluftreinigungsmaßnahmen die Stäube konzentriert in den Filtern als zu entsorgender Reststoff an. Erst durch das Erfassen ergibt sich die Möglichkeit zur Verwertung.

Nach dem Gewebefilter wird die Reinluft über einen Schornstein abgeleitet. Für die abgeschiedenen Stäube wurden im Untersuchungszeitraum Verwerter gesucht.

Maßnahmen zur Begrenzung der Emissionen an den geplanten Rinnen und Vorherden
Rinnen und Vorherde sind abgedeckt. Die entstehenden Emissionen werden abgesaugt und den nachgeschalteten Gewebefilteranlagen zugeführt und dort gereinigt. Die Emissionen werden also nicht mehr wie bisher in die Halle und anschließend über das Dach ohne Reinigung abgeleitet. Der Staub aus dem Gewebefilter wird deponiert. Verwertungsmöglichkeiten und vor allem bisherige Verwerterbetriebe werden gesucht.

8 Konzepte zur Vermeidung und Verwertung weiterer Abfälle/Reststoffe

Wie in Kapitel 7 dargestellt, hat der untersuchte Betrieb durch die Inbetriebnahme des Langzeit-Heißwindkupolofens bereits wirkungsvolle Maßnahmen zur Vermeidung der Ofenausbrüche sowie der Schlacken und Stäube ergriffen. Außerdem ist die Schlackengranulierung installiert, die Aufkonzentration der Gichtgasstäube durch Wiedereindüsung ist in Betrieb und Koksgruse werden extern verwertet. Im folgenden werden die noch verbleibenden Vermeidungs- und Verwertungsmöglichkeiten dargestellt wie

- Verwertung der Rinnenofenschlacken,
- Bewältigung des Schlackenabsatzes,
- Einsatz von sauberen Einsatzstoffen,
- Verminderung der Kokseinsatzmenge durch Sauerstoffeindüsung,
- Verringerung der Schlackenmenge durch Optimierung der Schlackenarbeit,
- Verringerung der Koksmengen durch Ölzusatzfeuerung,
- Verringerung der Koksmengen durch Erdgaszusatzfeuerung.

8.1 Verwertung der Rinnenofenschlacken

Grundsätzlich sind für die Rinnenofenschlacken dieselben Aufbereitungs- und Verwertungswege vorzusehen wie für die Kupolofenschlacken. Die gemeinsame Aufbereitung beider Schlakkenarten ist zu prüfen.

Die Rinnenofenschlacke ist eisenhaltiger als die Kupolofenschlacke. Deshalb ist alternativ die Wiederverwendung dieser Schlacke in einem Schmelzaggregat der Hochofenindustrie zur Nutzung der metallischen Anteile denkbar.

Für die Rinnenofenschlacken müssen Analysen erstellt werden. Anzustreben sind außerdem Untersuchungen hinsichtlich bestimmter Wiederverwendungsmöglichkeiten im Straßenbau oder als Baustoff, in der die technologischen Eigenschaften der Rinnenofenschlacken geklärt werden.

8.2 Bewältigung der Schlackenabsatzprobleme als Voraussetzung zur Verwertung

Die Schlacken konnten von dem untersuchten Betrieb bis vor etwa 10 Jahren noch zur Verwertung in den Baustoffhandel abgegeben werden. Seit Jahren werden die Schlacken aber wieder deponiert. Die Schlackenverwertung scheitert im wesentlichen daran, daß mögliche Abnehmer nicht bereit sind, die Schlacken abzunehmen. Die Gründe sind nach Aussagen des Betriebs:

- die Unsicherheit der Abnehmer über die möglichen noch nicht untersuchten Schadstoffe in den Schlacken;
- die natürlichen Konkurrenzprodukte Kies und Steinematerial sind günstig zu beziehen;
- potentielle Abnehmer benötigen große Mengen Schlacken mit einer möglichst gleichmäßigen Zusammensetzung;
- die Schlacken liegen nicht in der technologischen Form vor, wie sie der Abnehmer zum Wiedereinsatz benötigt.

Die Schlacken müssen deshalb in einem möglichst wirtschaftlichen Verfahren den Anforderungen an Anwendungsbereiche angepaßt werden. Umfassende Untersuchungen der Schlacken im Hinblick auf ihre Verwertungsmöglichkeiten sind erforderlich. Untersuchungsbedarf besteht

bezüglich der technologischen Eigenschaften der Schlacken für die Eignung in verschiedenen Wiedereinsatzgebieten. Außerdem verlangen die Abnehmer einen Garantienachweis über die Unbedenklichkeit der Schlacke bei einem Wiedereinsatz, z. B. durch Gutachten über das Eluierverhalten und die Festigkeit von Schlackengranulaten.

8.3 Vermeidung von sonstigen Stäuben durch den Einsatz von möglichst sauberen Einsatzstoffen

Alle nicht reaktionsfähigen Einsatzstoffe werden zu Reststoffen/Abfällen. Dies gilt für alle Verunreinigungen und Sandanhänge an den Einsatzmaterialien. Deshalb sind Einsatzmaterialien möglichst sauber zu halten. Zur Säuberung der metallischen Einsatzstoffe eignet sich z. B. das Strahlen. Oxidbildung auf den Einsatzmaterialien wird verringert, in dem z. B. die Einsatzstoffe überdacht gelagert werden. Wird das Material gestrahlt und gesäubert, entsteht bei dieser Verfahrensstufe ebenfalls ein Reststoff.

8.4 Verminderung des Kokszusatzes durch Sauerstoffeindüsung

Neuere Untersuchungen zeigen, daß das Eindüsen von Sauerstoff im Gestell zu besonders effektiver Temperaturerhöhung führt. Durch Sauerstoffanreicherung wird eine intensivere Verbrennung des Kohlenstoffs bewirkt. Es tritt eine höhere Verbrennungstemperatur ein.

Auch beim Anfahren des Kupolofens läßt sich durch Sauerstoffeindüsung die benötigte Eisentemperatur beschleunigt erhöhen. Der Anreicherungsanteil liegt stets unter 6 % O_2. Bei höheren O_2-Anteilen treten örtlich zu hohe Überhitzungen auf und der CO-Anteil bei Überhitzungen steigt an. Die Dosierung des O_2 erfolgt mit kalibrierten Düsen. Eine Verbesserung der Schmelzleistung um 10 bis 15 % und eine Erhöhung der Eisentemperatur von 2 bis 2,5 Prozent ist möglich.

Für den untersuchten Kupolofen ist zu prüfen, inwieweit die sauerstoffangereicherte Fahrweise bezüglich der Produktqualität, der Ofentechnologie als auch eines vertretbaren Investitionsaufwandes verstärkt möglich ist. Außer der Schlackenverminderung sind primäre Energieeinsparungen zu erwarten.

8.5 Verringerung der Schlackenmenge durch Optimierung der Schlackenarbeit

Durch den optimierten Einsatz der Schlackenbildner läßt sich direkt auf die Schlackenentstehung und Schlackenmenge Einfluß nehmen.

Der **Kalksteinzusatz** beeinflußt die Schlackenmenge unmittelbar. Bereits eine Steigerung von 3 auf 4 % erhöht die Schlackenmenge von 6 auf 8 %, bezogen auf die Flüssigeisenmenge. Auch die Reinheit beeinflußt in geringerem Umfang die Schlackenmenge.

Es ist üblich, eine Menge von Kalkstein zuzugeben, die zwischen 20 und 35 % der Koksmenge liegt. Die Kalksteindosierung muß der optimalen Schmelzführung entsprechen. Mit der Reduzierung der Kalksteinmenge und dadurch der Verringerung des Abbrandes ist auch die Verringerung der Schlackenmenge zu erwarten. Es müßte untersucht werden, ob in dem futterlosen Kupolofen der Kalksteinzusatz weiter verringert werden kann.

8.6 Verringerung der Koksmengen durch Ölzusatzfeuerung

Die beim Hochofen mit Zusatzfeuerung gemachten guten Erfahrungen versucht man auch für den Kupolofen zu nutzen. Die Ölverbrennung ist vor Eintritt in den Ofenschacht, also noch au-

ßerhalb des Kupolofens, durchzuführen. Zudem hängt der Nutzeffekt von der Anordnung der Brenner ab. Die Wärme wird über Düsen in den Brennraum geführt.

Die Substitution von Koks durch Öl kann zu einer Einsparung des Ausgangskokssatzes bis zu 30 % führen. Bedeutsam für die Reststoffsituation ist, daß durch die Kokssubstitution der Staubwurf spürbar sowie die Schlackenmenge geringfügig vermindert wird. Denn ein Teil der Koksasche bindet sich immer auch in den Schlacken. Der verstärkte Einsatz von Öl als Zusatzfeuerung muß geprüft werden.

8.7 Verringerung der Koksmengen durch Erdgaszusatzfeuerung

Prinzipiell ist die Gaszusatzfeuerung mit dem Einsatz von Öl vergleichbar. Die Untersuchungen hierüber sind breiter angelegt, so daß man insbesondere die Frage nach der günstigsten Eindüsungshöhe konkreter beantworten kann.

Ähnlich wie bei der Ölzusatzfeuerung hat man den Koks stufenweise bis zu 40 % zu substituieren, was einer Kokssatzerniedrigung von 15 auf 9 % entspricht.
Durch die starke Kokssatzerniedrigung muß ein geringerer Kohlenstoffzubrand und ein leicht erhöhter Siliziumverlust in Kauf genommen werden. Der durch Erdgassubstitution verminderte Staubauswurf sowie die Schlackenverminderung ist mit dem der Ölfeuerung vergleichbar. Der verstärkte Einsatz von Gas zur Substitution von Koks muß geprüft werden.

8.8 Verwertung der sonstigen Stäube durch Schadstoffentfrachtung und Inertisierung

Um die Ablagerung auf Sonderabfalldeponien zu umgehen, ist gegebenenfalls die Schadstoffentfrachtung mit anschließender Verfestigung der Abfälle als Aufbereitungsmaßnahme vorzusehen.

Der Betrieb muß die sonstigen gefaßten Stäube an den verschiedenen Anfallstellen quantifizieren und die Zusammensetzungen untersuchen. Danach sind Aufbereitungs- und Verwertungsmöglichkeiten festzulegen. Die sonstigen Stäube können je nach Metallgehalten wieder in den Kupolofen eingedüst oder pelletiert eingesetzt werden. Oder sie sind zu inertisieren, um sie umweltverträglich auf Hausmülldeponien entsorgen zu können.

9 Entscheidungskriterien zur Durchführung von Maßnahmen zur Vermeidung und Verwertung von Abfällen

9.1 Vermeidungs- und Verwertungspotentiale

Für die abfallwirtschaftliche Bewertung abfall-/reststoffarmer Produktionsverfahren und Verwertungsverfahren ist das erreichbare Abfallvermeidungs- und -verwertungspotential maßgeben. Um nicht Abfall-/Reststoffvermeidung oder -verwertung auf Kosten der Luft- und Wasserqualität zu betreiben, müssen die zur Auswahl stehenden Vermeidungs- und Verwertungstechniken aber auch hinsichtlich der luft- und wasserseitigen Emissionen beurteilt werden.

9.2 Technische Realisierbarkeit und Zumutbarkeit

Nach § 5 Abs. 1 Nr. 3 Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) ist der Betreiber einer genehmigungsbedürftigen Anlage verpflichtet, diese so zu errichten und zu betreiben, daß Reststoffe vermieden werden, es sei denn, sie werden ordnungsgemäß und schadlos verwertet oder – soweit Vermeidung und Verwertung technisch nicht möglich oder unzumutbar sind – als Abfälle ohne Beeinträchtigung des Wohls der Allgemeinheit beseitigt. Reststoffvermeidung und -verwertung haben Vorrang vor der Pflicht zur Beseitung. Nur wenn die Vermeidung oder Verwertung von Reststoffen technisch nicht möglich oder unzumutbar ist, sind diese als Abfälle ordnungsgemäß zu beseitigen. Die wesentlichen Kriterien, anhand derer zu beurteilen ist, ob Maßnahmen zur Vermeidung und Verwertung von Reststoffen durchgeführt werden müssen, sind die technische Realisierbarkeit und ihre Zumutbarkeit. In der Verwaltungsvorschrift des Landes Baden-Württemberg zur Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Reststoffen nach § 5 Abs. 1 Nr. 3 BImSchG werden die unbestimmten Rechtsbegriffe der technischen Realisierbarkeit und Zumutbarkeit erläutert.

Technisch möglich ist die Vermeidung bzw. die Verwertung von Reststoffen, wenn zur Erreichung des Betriebszweckes ein praktisch geeignetes Verfahren mit geringerem Reststoffanteil bzw. ein Verwertungsverfahren zur Verfügung steht. Bei der Bestimmung des Standes der Technik zur Reststoffvermeidung/-verwertung sind insbesondere vergleichbare Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen heranzuziehen, die mit Erfolg im Betrieb erprobt worden sind.

Wirtschaftlich zumutbar sind die Vermeidungs- und Verwertungsalternativen stets dann, wenn sie von Betrieben vergleichbarer Anlagen bereits angewendet werden oder der mit ihrer Realisierung verbundene Aufwand nicht dazu führt, daß für die erzeugten Produkte keine Vermarktungsmöglichkeiten mehr bestehen.

Überschreiten die Kosten von Verwertungsmaßnahmen die Kosten der Abfallbeseitigung in erheblichem Ausmaß, so gilt die Verwertung als wirtschaftlich zumutbar, wenn die hierzu erforderlichen Aufwendungen in einem vertretbaren Verhältnis zu den gesamten Produktionskosten stehen.

9.3 Organisatorische Integration und Akzeptanz

Die Einführung und Umsetzung von geplanter Vermeidung und Verwertung erfordert eine Umstellung von Arbeitsabläufen und Gewohnheiten im Betrieb. Der Erfolg hängt in hohem Maße vom aktiven Mitwirken aller Mitarbeiter auf allen Organisationsstufen eines Betriebs oder einer Anlage ab.

Deshalb ist das rechtzeitige Miteinbeziehen der betroffenen Mitarbeiter bereits in der Planungsphase von großem Nutzen. So können Schwierigkeiten bei der Einführung frühzeitig erkannt werden. Die Mitarbeiter betrachten die Umstellung nicht als ein Erschwernis. Maßnahmen zur Förderung der „Akzeptanz" sind Schulungen, Besichtigungen, Aufklärung über den Zweck und das Ziel einer Verfahrensumstellung.

9.4 Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Neben der technischen Durchführbarkeit sind zusätzlich wirtschaftliche Kriterien bei der Bewertung von Maßnahmen zur Vermeidung und Verwertung zu berücksichtigen.

Die Entsorgungskosten werden in den nächsten Jahren deutlich ansteigen. Dies gilt insbesondere für die besonders überwachungsbedürftigen Abfälle. Die Landesabfallabgabe in Baden-Württemberg sowie der sehr knappe Sonderabfalldeponieraum werden dazu beitragen.

Bei der Bewertung von betrieblichen Maßnahmen zur Vermeidung und Verwertung von Abfällen sind zwei Fälle für Investitionen zu unterscheiden:

- Im ersten Fall werden die Produktionsanlage oder Teile der Anlage durch eine abfallarme Anlage oder Teilanlagen ersetzt. In diesem Fall wird ein Kostenvergleich erstellt, der abklären soll, inwieweit die abfallarme Anlage kostengünstiger arbeitet und ab welchem Zeitpunkt die Altanlage am besten ersetzt werden sollte.
- Im zweiten Fall wird die Verwertungsanlage oder -maßnahme zusätzlich zur eigentlichen Produktionsanlage beschafft. Von betriebswirtschaftlicher Seite ist dann die Zusatzinvestition von Bedeutung.

Die **Betriebskosten** sind neben dem Kapitaldienst für die getätigten Investitionen (Annuitäten) alle durch den Betrieb der Zusatzanlage entstehenden Kosten für Personal, Energie, Wartung, Material und für die Entsorgung der noch anfallenden Reststoffe.

Als **Erlöse** gehen alle eingesparten Kosten in die Berechnung mit ein. Hierzu zählen insbesondere die eingesparten Entsorgungskosten sowie eingesparte Materialkosten. Außerdem Einsparung an Energiekosten oder Erlöse durch den Verkauf von aufbereitetem Reststoff als Wertstoff. Der errechnete Kapitalwert nimmt einen positiven Wert an, wenn der break-even-point (Gewinnschwelle) erreicht ist. Der Zeitraum bis zum Erreichen der Gewinnschwelle ist die Amortisationszeit.

9.5 Entsorgungskosten

Die Abfallentsorgungskosten richten sich nach der Art der Abfälle. Die Entsorgungskosten spielen eine entscheidende Rolle für den Zeitpunkt der Einführung einer Maßnahme. Diese sind außerdem von der Abfallsatzung der entsorgungspflichtigen Körperschaft abhängig. Den Deponiekosten zuzuschlagen sind außerdem die Transportkosten.

Auf besonders überwachungsbedürftige Abfälle werden zu den Deponiekosten seit 1.4.1991 durch das Landesabfallabgabengesetz (LAbfAG) von Baden-Württemberg Abfallabgaben zwischen DM 50 und DM 150 je nach Abfallkategorie und seit 1993 DM 100 bis DM 300/t erhoben.

Derzeitige Entsorgungs- und Transportkosten
Die Deponie- bzw. Verbrennungs- und Transportkosten ergeben die Entsorgungskosten für eine Abfallart. Nachfolgend sind die derzeitigen durchschnittlichen Entsorgungskosten aufgeführt.

Entsorgungsweg	Entsorgungskosten einschl. Transport DM/t
Hausmülldeponie (HMD)	50–150
Sonderabfalldeponie (SAD)*	bis 700

* zuzüglich Sonderabfallabgabe

Tab. 9-1: Durchschnittliche Entsorgungskosten (1993)

Die Betreiber der Entsorgungsanlagen und auch die Transporteure verlangen unterschiedliche Preise. Die durchschnittlichen Transportkosten von hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen liegen zwischen 10 bis 50 DM/t und für Sonderabfälle zwischen 30 bis 120 DM/t. Die Entsorgungskosten für den untersuchten Betrieb zeigt die folgende Tabelle. Die Deponierungskosten inkl. Transport betragen noch ca. 15 DM/t für die produktionsspezifischen Abfälle. Die Gutschriften für Koksgrus betragen ca. 15 % des Koksneupreises von ca. 450 DM/t.

	Abfallart	Mengen t/a	Deponie/ Transport-kosten DM/t	Deponie/ Transport-kosten DM/a	Aufbereitung/ Transport-/ Verwertungs-kosten (+) erlöse (–) DM/a	Gesamtkosten für die einzelnen Abfallarten DM/a
R 1	Kupolofenschlacke	8 000	15,50	124 000	–	124 000
R 2	Rinnenofenschlacke	500	15,50	7 750	–	7 750
R 3	Gichtgasstäube	1 000	–	–	200 000	200 000
R 4	Ofenausbrüche	250	15,50	3 875	–	3 875
R 5	Koksgrus	850	–	–	(–) 57 375	(–) 57 375
R 6	Staub aus Rinnenöfen	n. b.	–	–	–	–
R 7	Staub von Förderbändern	n. b.	–	–	–	–
	Gesamtkosten der Entsorgung (ohne R 6, R 7)					278 250

Tab. 9-2: Entsorgungskosten durch Deponierung/Transport/Aufbereitung/Verwertung aller Abfälle/Reststoffe für den untersuchten Betrieb (1991)

9.6 Aufbereitungskosten im untersuchten Betrieb zur Verwertung der Reststoffe

Kosten zur Schlackengranulierung
Der Investitionsbedarf zur Schlackengranulierung im untersuchten Betrieb liegt bei ca. 1000000 DM für Schlackenauslauftrichter, Schlackenrinne, Sammelbehälter mit Sieb, Pumpen, Schlackensilo und Wassertrennung im Silo. Die Aufbereitungskosten setzen sich aus Betriebskosten und dem Kapitaldienst zusammen und betragen pro Tonne granulierter Schlacke im untersuchten Betrieb 25,50 DM/t.

Kosten für die Aufbereitung durch Wiedereindüsung der zinkhaltigen Stäube
Die Investitionen zur Staubeindüsung werden von dem Betreiber mit ca. 400000 DM beziffert. Die Betriebskosten inklusive Kapitaldienst ergeben spezifische Kosten zur Aufkonzentrierung der Stäube von ca. 40 bis 70 DM/t. Hinzu kommen etwa 100 bis 150 DM/t Verwertungskosten des Aufbereitungsbetriebs sowie die Transportkosten von etwa 50 bis 80 DM/t. Somit betragen die Gesamtkosten zur Verwertung der Gichtgasstäube 190 bis 300 DM/t Gichtgasstaub.

Koksgruse
Zur Verwertung der Koksgruse müssen die Anschaffungskosten für die Big Bags und die Transportkosten berücksichtigt werden. Die Aufbereitung der Koksgruse ist nicht erforderlich. Abzüglich der Transportkosten und der Kosten für die Big Bags verbleibt dem Betrieb ein Verlust von etwa 85 % der Kokskosten. Die Kokskosten betragen 450 DM/t. Aus diesem Grund sollte der Wiedereinsatz der Koksgruse im eigenen Kupolofen geprüft werden.

Sonstige Reststoffe
Die Stäube aus den Rinnenöfen werden derzeit hinsichtlich der Ablagerungsfähigkeit auf eine Hausmülldeponie oder ihrer Verwertung zusammen mit den Gichtgasstäuben oder dem Verwerten der metallischen Anteile in einem Stahlwerk untersucht. Bei der gemeinsamen Verwertung mit den Gichtgasstäuben entstehen Kosten zwischen 190 bis 300 DM/t. Die Kosten für den Transport und die Abnahmegebühren zur Verwertung in einem Stahlwerk liegen schätzungsweise bei 150 bis 250 DM/t.

Literaturverzeichnis

Anlagenprogramm des Bundesministers des Innern; Hrsg.
Verminderung der staub- und gasförmigen Emissionen bei einer bestehenden Heißwind-Kupolofenanlage, Umbau Schmelzerei und Gichtgassystem
Georg Fischer GmbH, Mettmann
UBA-FB Z5/II 50 441-5/6; 1981

Anlagenprogramm des Bundesministers des Innern; Hrsg.
Verbesserung der Entstaubung einer Kupolofen-Schmelzanlage durch Ofenumbau und Änderung der vorhandenen Entstaubungseinrichtung
Fritz Winter Eisengießerei, Stadtallendorf
UBA-FB Z5/50 441-3/10, 1985

Anlagenprogramm des Bundesministers des Innern; Hrsg.
Emissionsminderung durch Umbau der Kupolofen-Schmelzanlage – durch Ersatz des alten Heißwind-Kupolofens durch einen futterlosen Kupolofen
Eisenwerk Brühl, Köln
UBA-Altanlagenreport 1018, 1984

Brunhuber E.
Gießereilexikon – Ausgabe 1986 –
Dreizehnte Auflage;
Fachverlag Schiele + Schön, Berlin 1986

Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT), Hrsg.
Untersuchung über die Möglichkeit der Verwendung von BEWAG-Kohlenschlacken in der bituminösen Tragschicht von Asphaltbefestigungen
Forschungsbericht T 81-126; 1981

Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT), Hrsg.
Entlastung der Umwelt durch Aufbereitung bisher deponierter Sodaschlacke
Stahlwerke Peine-Salzgitter AG
Salzgitter, Juni 1988

Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT), Hrsg.
Verwertung von feinkörnigen Reststoffen der Eisen- und Stahlindustrie
Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken, Duisburg 1986
Forschungsbericht T 86-123

Bundesverband der Deutschen Schrottwirtschaft e. V. (BDS), Hrsg.
Vom Schrott zum Stahl
– Ein Fachbegleiter für die Rohstoffrückgewinnung –
Verlag Handelsblatt GmbH, Düsseldorf 1984

BUS Berzelius Umweltservice Information
Aufbereitung zinkhaltiger Stahlwerksstäube
Frankfurt 1990

Dallmann A.; Orths K.
Einflüsse auf die Schlackenbildung im sauer ausgekleideten Kupolofen und Bedeutung der Schlacke für die chemische Zusammensetzung des Eisens
Gießerei, 61 (1974) 26

Davids, P.; Lange, M.
TA Luft '86 – Technischer Kommentar
VDI-Verlag Düsseldorf, 1986

Dreißigacker, H. L.; Weber, E.
Emissionsfaktoren für Kupolöfen mit unterschiedlichen Entstaubern

Geck, H.; Pretzer, G.; Schäfer, K.; Selenz, H.-J.:
Einblasen von Filterstäuben in Konverter mit Bodendüsen am Beispiel der Georgsmarienhütte
Stahl und Eisen, 109 (1989) 7

Fakten und Daten
Eisenguß, Stahlguß, Duktiles, Gußeisen
Deutscher Gießerverband (DGV), 1989

Fleischer, G. (Hrsg.)
Vermeidung und Verwertung von Abfällen 2
EF-Verlag Berlin, 1990

Gesamtverband Deutscher Metallgießereien (GDM)
Geschäftsbericht
Düsseldorf 1989

Gesellschaft Deutscher Metallhütten- und Bergleute (GDMB), Hrsg.
Abfallstoffe in der Nichteisen-Metallurgie
Vorträge beim 17. Metallurgischen Seminar d. GDMB
VCH-Verlagsgemeinschaft, Weinheim 1986

Gesellschaft für Hüttenwerksanlagen (GHW), Hrsg.
Beschreibung einer Heißwind-Kupolofenanlage
Düsseldorf 1989

Graner, C.
Sind die Grenzen für die Verwertung von Reststoffen schon erreicht?
Müll und Abfall 2/1991

Gudenau, H.; Linder, K.-H.; Maas, P.; Peters, K.-H.
Schlackenwärmenutzung
Stahl und Eisen, 106 (1986) 23

Gußprodukte 1990
Jahreshandbuch für Gußanwender
Verlag Hoppenstedt & Co., Darmstadt, 1990

Helbling R.
Erfahrungen mit dem Drehtrommelofen zum Eisenschmelzen
Gießerei, 66 (1979) 4

Hessisches Ministerium für Umwelt und Reaktorsicherheit (HMUR), Hrsg.
Stand der Technik von Vermeidung und Verwertung von Reststoffen bei genehmigungsbedürftigen Anlagen der 4. BImSchV
FICHTNER Stuttgart, September 1990

Hiersche, E.-U. (Hrsg.)
Untersuchungen an Elektroofenschlacke und Schlackengranulat im Hinblick auf ihre Verwendung im Straßenbau
Erarbeitet vom Lehrstuhl für Straßen- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe im Auftrag der Badischen Stahlwerke (BSW), 1990

Intecus
Entsorgungsstruktur und Lösungen auf dem Gebiet der Sonderabfälle in den Wirtschaftszweigen Hüttenindustrie, Chemische Industrie, Metallbe- und -verarbeitung
Berlin 1989

Janke; Koch
Schlacken in der Metallurgie
Verlag Stahleisen, Düsseldorf 1984

Johann, H.-P.
Umwelttechnologien in der Eisen- und Stahlindustrie
VDI-Umwelt, 5 (1989)

Kaas, W.; Köhler, E.; Borggrefe, H.; Unger, K.-D.:
Erzeugung und Verarbeitung armierter Filterstaubbriketts aus der Edelstahlerzeugung
Stahl und Eisen, 104 (1984) 7

Landesabfallabgabengesetz (LAbfAG)
Regierung des Landes Baden-Württemberg
Gesetzblatt; Nr. 7 (1991)

Lurgi Information
Wiedergewinnung von Wertstoffen aus Rückständen metallurgischer und chemischer Prozesse
Frankfurt 1989

Maas, T.
Rückstände der Eisen- und Stahlindustrie
Müll-Handbuch, Kennzahl 8575
Erich Schmidt Verlag, Berlin

Ministerium für Umwelt Baden-Württemberg (Hrsg.)
Vermeidung von Abfällen durch abfallarme Produktionsverfahren (Voruntersuchung)
Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (FHG-ISI)
Karlsruhe 1989

Moll, W.
Taschenbuch für Umweltschutz
IV: Chemikalien in der Umwelt
Ernst Reinhard Verlag, München 1987

Neumannn, F.
Technologie des Schmelzens für Eisen- und Stahlguß
Sonderdruck der BBC-Brown Boveri aus dem Handbuch der Fertigungstechnik
(Band 1)

Plockinger, E.; Etterich, O.
Elektrostahlerzeugung
Verlag Stahleisen Düsseldorf 1979
Reststoffvermeidung von Kühlschmierstoffen und Schlacken
Diplomarbeit
FICHTNER Stuttgart, 1990

Sattler, K.; Emberger, J.
Behandlung fester Abfälle
– Vermeiden, Verwerten, Sammeln, Beseitigen, Sanieren –
Vogel Verlag Würzburg, 1990

Spur, G., Stöferle, Th.
Handbuch der Fertigungstechnik
Band 1– Urformen –
Carl Hauser Verlag, München 1981

Statistisches Bundesamt Wiesbaden (Hrsg.)
Statistisches Jahrbuch 1990 für die Bundesrepublik Deutschland
Metzler-Poeschel Verlag, Stuttgart 1990

Statistisches Bundesamt Wiesbaden (Hrsg.)
Produktion im produzierenden Gewerbe
Fachserie 4; Reihe 3.1
Metzler-Poeschel Verlag, Stuttgart 1989

Statistisches Bundesamt Wiesbaden (Hrsg.)
Abfallbeseitigung im Produzierenden Gewerbe und in Krankenhäusern
Reihe 1.2
Verlag Kohlhammer GmbH, Stuttgart 1987

Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (Hrsg.)
Statistik von Baden-Württemberg
Verarbeitendes Gewerbe 1989
Band 421
Stuttgart, Dezember 1980

Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (Hrsg.)
Statistisch-prognostischer Bericht 1989/90
Daten – Analysen – Perspektiven
Stuttgart, Juni 1990

Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (Hrsg.)
Statistische Berichte (Sonderbericht)
Verarbeitendes Gewerbe in den Stadt- und Landkreisen Baden-Württembergs 1989;
Stuttgart 1990

Sutter, H. (Hrsg.)
Vermeidung und Verwertung von Abfällen 1
EF-Verlag Berlin, 1989

Thome Kozmienski K. J. (Hrsg.)
Recycling in der Bauwirtschaft
EF-Verlag Berlin, Mai 1987

Thome-Kozmienski K. J. (Hrsg.)
Recycling von Metallen
EF-Verlag Berlin, März 1987

Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie
Band 12 – „Gußeisen, Temperguß und Stahlguß"
Verlag Chemie Weinheim

Verein Deutscher Eisenhüttenleute (Hrsg.)
Bolbrinker, K.:
Stahlfibel
Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf 1980

Verein Deutscher Gießereifachleute (VDG), Hrsg.
Schmelzen von Gußeisenwertstoffen im Kupol- und Induktionsofen
Seminar in Düsseldorf 1991
Düsseldorf 1991

Abbildungsverzeichnis

Abb.
Nr.

1-1 Konzeptionelle Darstellung von Vermeidung und Verwertung in abfallarmen Produktionsanlagen

2-1 Einteilung und Übersicht der wichtigsten Schmelzprodukte in Gießereibetrieben
2-2 Schmelzen von Eisenguß
2-3 Spezifischer Energieverbrauch der Eisen-, Stahl- und Tempergießereien der Bundesrepublik
2-4 Heißwind-Kupolofenanlage mit Entstehung und eigenbeheiztem Winderhitzer
2-5 Zoneneinteilung des Kupolofens
2-6 Beziehungen zwischen Windmenge, Kokssatz und Schmelzleistung
2-7 Eisenoxidgehalt der Schlacke in Abhängigkeit von der Windtemperatur bei verschiedenen Kokssätzen
2-8 Vorrichtung zur kontinuierlichen Entschwefelung von Gußeisen im Durchlaufverfahren
2-9 Schema einer Schmelzanlage mit fahrbarem Tagesbunker, Magnetkran und Verschiebewagen
2-10 Übersicht über eine Gesamt-Kupolofen-Schmelzanlage mit Winderhitzer und Entstaubungsanlage
2-11 Beispielhafte Stoffbilanz eines Heißwind-Kupolofens mit Ofenfutter für 1.000 kg Flüssigeisen
2-12 Schachtofenprinzip
2-13 Aufbau und Abmessungen eines sauer ausgekleideten Kupolofens
2-14 Zusatzkoksmengen zum Ausgleich der Wandverluste mit und ohne Wandberieselung
2-15 Drucksiphon mit Wasserkühlung zur Verbesserung der Haltbarkeit der Zustellung

3-1 Zusammensetzung von Kupolofenschlacken in Abhängigkeit vom Verbrennungsverhältnis

4-1 Kupolofen mit Sekundäreindüsung
4-2 Anstieg der Abstichtemperatur bzw. Ersparnis an Koks beim Betrieb mit Sekundärluft
4-3 Einfluß verschiedener Arten einer Sauerstoffzugabe zum Kupolofen sowie des Arbeitens mit Sekundärwind ohne und mit Sauerstoffzusatz in der unteren Düsenebene auf die Eisentemperatur
4-4 Futterloser Kupolofen für vollständige Gasabsaugung
4-5 Koksloser Kupolofen
4-6 Konstruktionsprinzip des gasgefeuerten Koks-Kupolofens
4-7 Staubanfall in Beziehung zum Kokssatz/Verminderte Staubmenge bei Gaszusatzfeuerung
4-8 Gastemperaturverlauf in der Randzone eines koksgefüllten Schachtofens bei unterschiedlicher Koksstückgröße

5-1 Anordnung der Anlagenkomponenten in der untersuchten Kupolofenschmelzanlage
5-2 Schematischer Ablauf des Kupolofenbetriebes

6-1 Prinzipielles Stoffflußbild der Heißwind-Kupolofen-Schmelzanlage

Tabellenverzeichnis

Tab. Nr.

0-1 Übersicht zur Vermeidung, Behandlungsmaßnahmen und Verwertungsmöglichkeiten für Abfälle/Reststoffe aus dem Kupolofenbetrieb

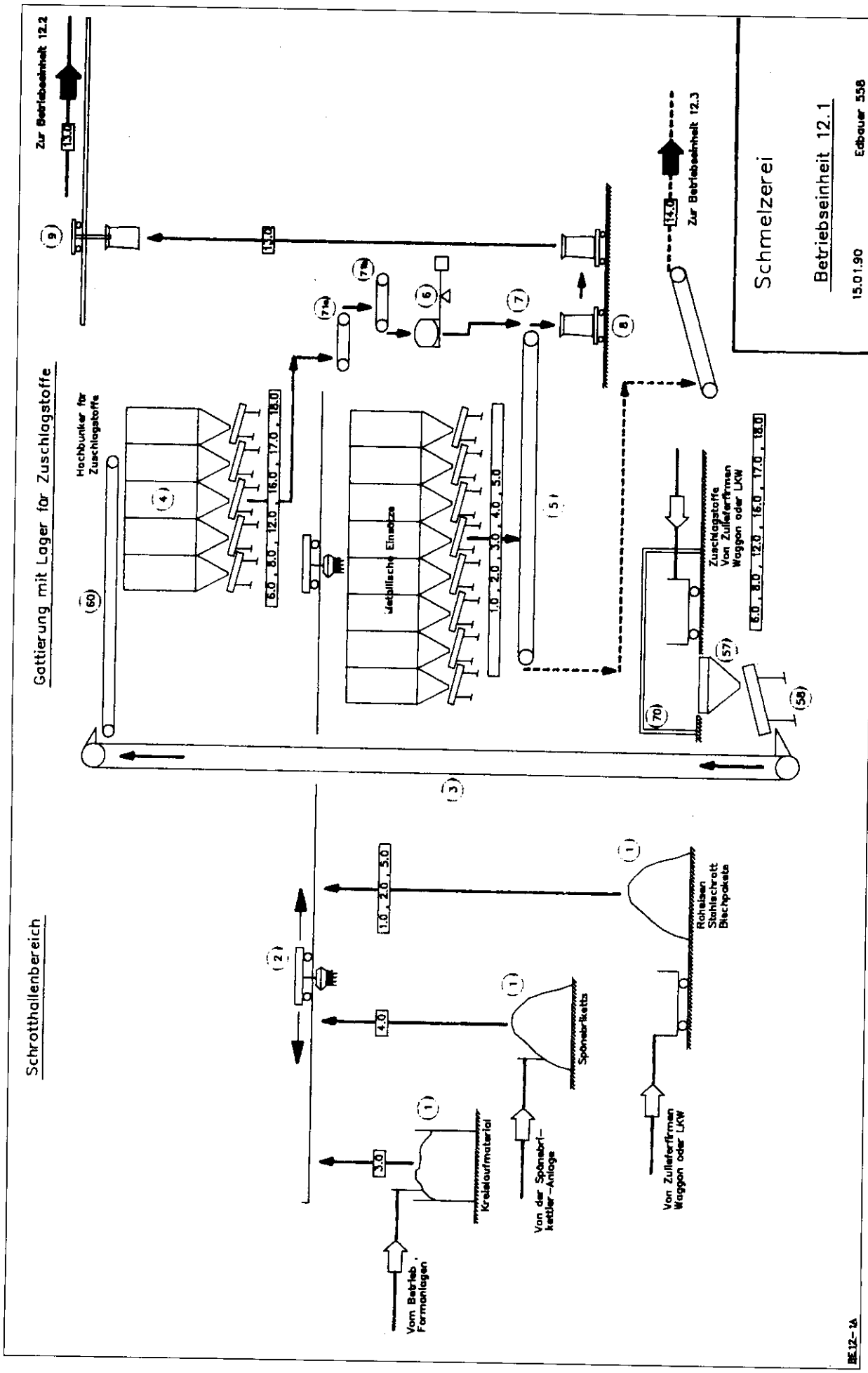
2-1 Energieflüsse in einer futterlosen Heißwind-Kupolofenanlage mit nachgeschaltetem Induktionsrinnenofen
2-2 Betriebssysteme koksgefeuerter Kupolöfen
2-3 Staubauswurf in Abhängigkeit vom Kokssatz und von der Ofenart
2-4 Emissionsfaktoren des Staub- und Gasauswurfs in kg/t Fe
2-5 Technische und wirtschaftliche Angaben von Staubabscheidern

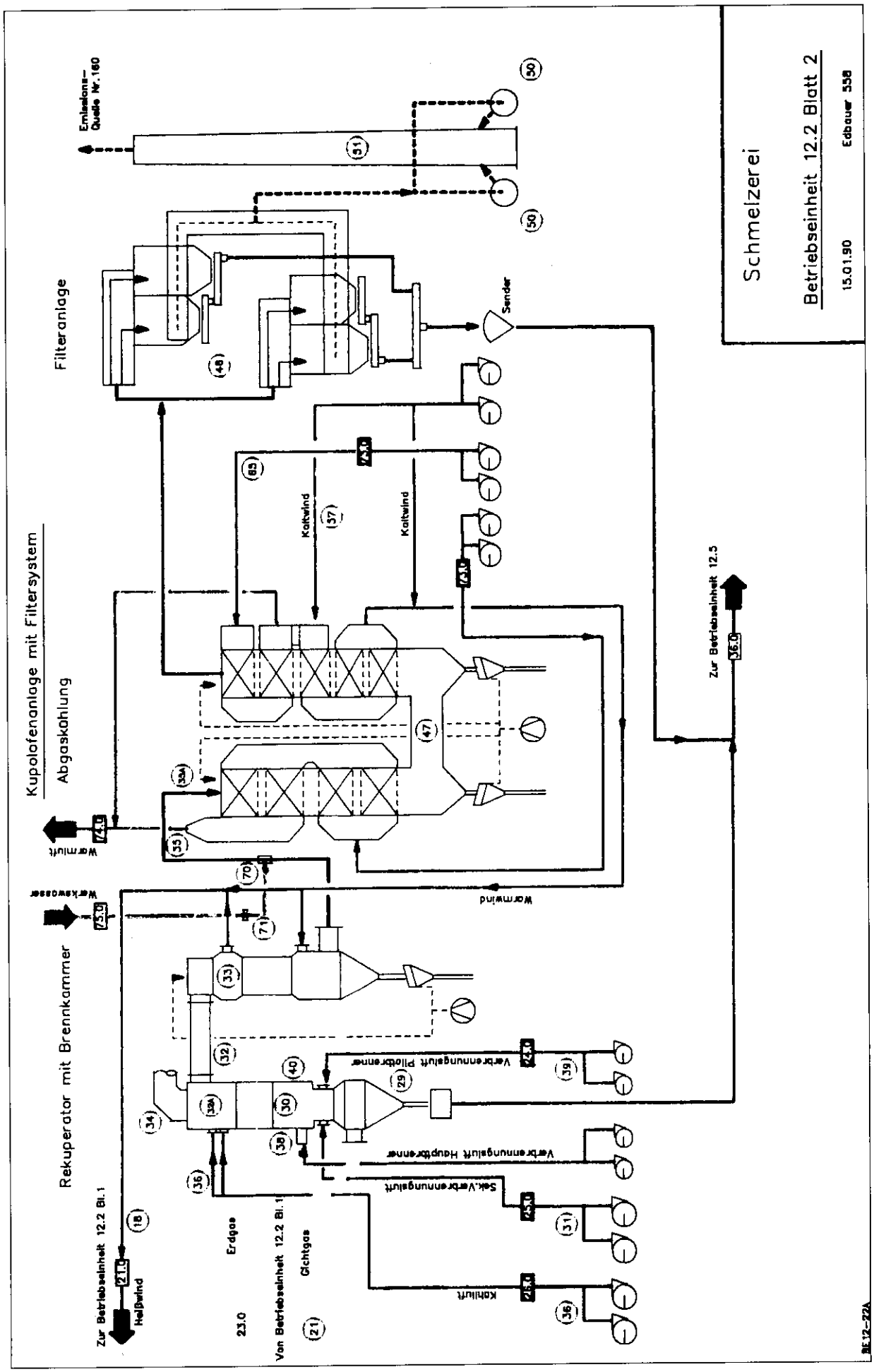
3-1 Zusammensetzung von Kupolofenschlacken
3-2 Zusammensetzung der Stampfmassen für die Ofenfutter aus Kupolofen und Induktionsrinnenofen
3-3 Beispielhafte Eluatauswertung von Kupolofenausbruch
3-4 Beispielhafte Zusammensetzung von Koksgrus

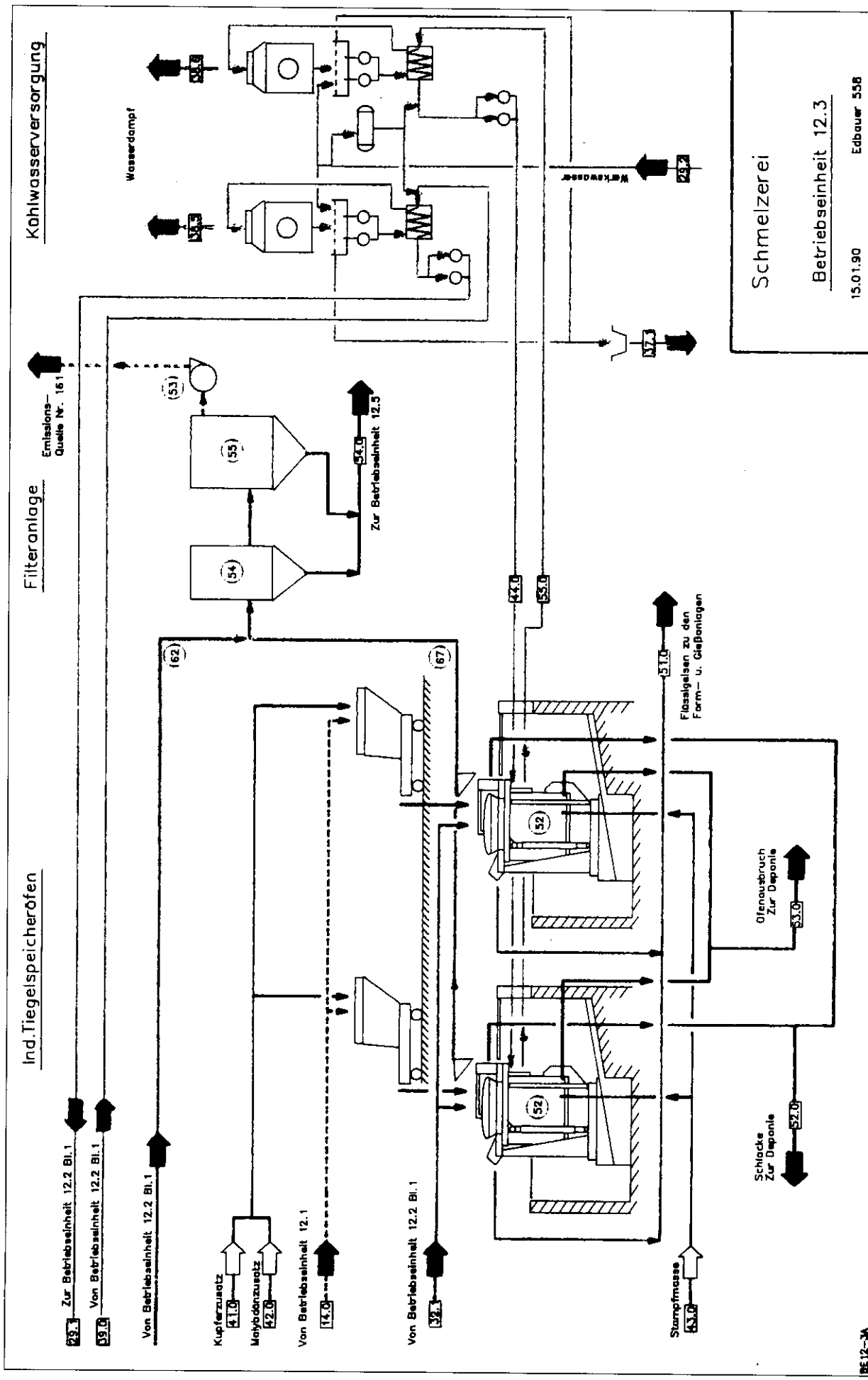
4-1 Übersicht der möglichen Verfahrensmodifikationen zur Verringerung der Reststoffmengen in Kupolöfen
4-2 Übersicht der Rangfolge der Vermeidungspotentiale bei den verschiedenen Kupolofenvarianten, geordnet nach Gruppen
4-3 Kurzbeschreibung der Verfahrensmodifikationen, deren Auswirkungen, Bewertung, Vermeidungspotentiale und Reststoffanteil in den verschiedenen Kupolofenvarianten
4-4 Übersicht der Vorbehandlungs- und Verwertungsmöglichkeiten für Abfälle/Reststoffe aus dem Kupolofenbetrieb

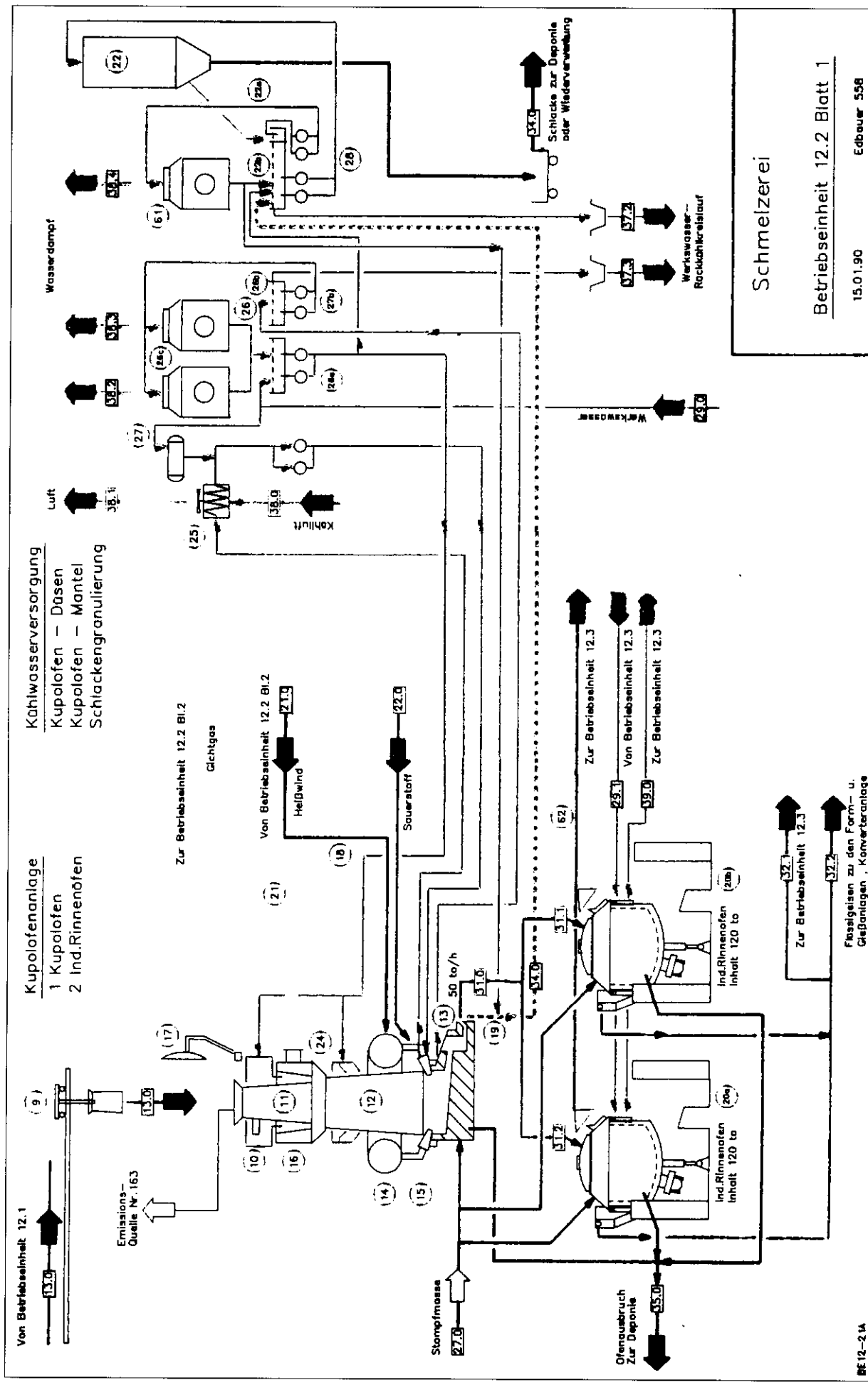
6-1 Einsatzstoffe und -mengen wie Eisenträger, Legierungsbestandteile, Zuschläge, Verbrennungsmedien und Hilfsstoffe für den Normalbetrieb der untersuchten Kupolofen-Schmelzanlage
6-2 Wesentliche Eisenträger zur Erzeugung des Gußeisens
6-3 Reststoffe – ihre Herkunft, Entsorgung sowie vorgesehene Vermeidung und Verwertung
6-4 Bestandteile der Kupolofenschlacke
6-5 Eluationsverhalten der Kupolofenschlacke
6-6 Metallische Anteile der Gichtgasstäube
6-7 Zusammensetzung des Flüssigeisens aus dem Kupolofen

9-1 Derzeitige durchschnittliche Entsorgungskosten (1990)
9-2 Derzeitige Entsorgungskosten durch Deponierung/Transport/Aufbereitung/Verwertung aller Abfälle/Reststoffe für den untersuchten Betrieb (1991)

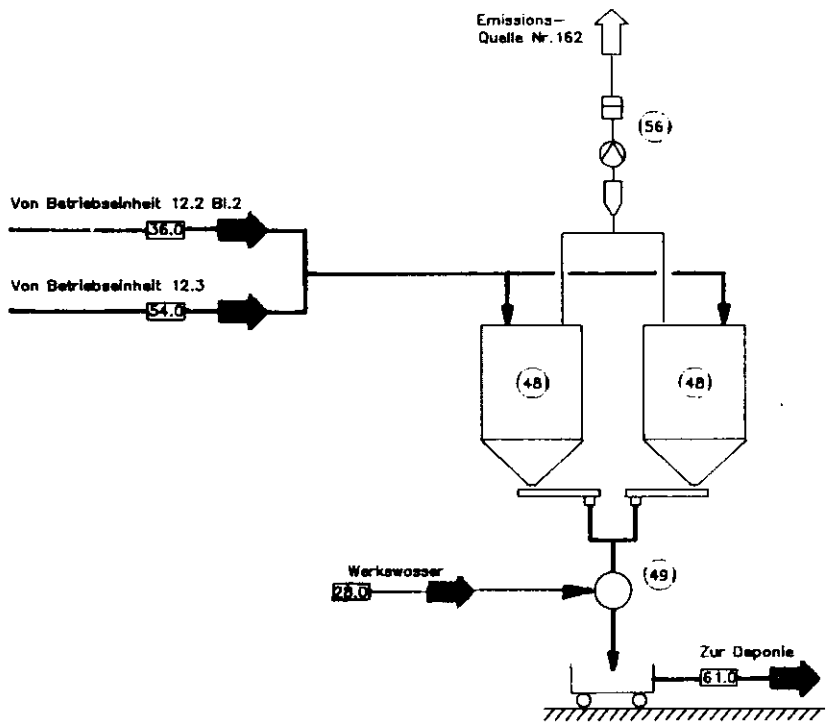

Schmelzerei
Betriebseinheit 12.1
15.01.90
Edbauer 558
Gattierung mit Lager für Zuschlagstoffe
Schrotthallenbereich
Zur Betriebseinheit 12.2
Zur Betriebseinheit 12.3
Hochbunker für Zuschlagstoffe
Metallische Einsätze
Zuschlagstoffe Von Zulieferfirmen Waggon oder LKW
Kreislaufmaterial
Spänebriketts
Von der Spänebri-kettier-Anlage
Von Zulieferfirmen Waggon oder LKW
Vom Betrieb Formanlagen
Roheisen Stahlschrott Blechpakete
BE 12-1A


Schmelzerei
Betriebseinheit 12.2 Blatt 2
15.01.90
Edbauer 558
Kupolofenanlage mit Filtersystem
Abgaskühlung
Filteranlage
Emissions-Quelle Nr. 160
Sender
Kaltwind
Kaltwind
Zur Betriebseinheit 12.5
Warmluft
Warmwind
Wasserkreislauf
Rekuperator mit Brennkammer
Verbrennungsluft Pilotbrenner
Verbrennungsluft Hauptbrenner
Sek.Verbrennungsluft
Kühlluft
Zur Betriebseinheit 12.2 Bl.1
Heißwind
Erdgas
Von Betriebseinheit 12.2 Bl.1
Gichtgas
23.0
BE12-22A


Kühlwasserversorgung
Wasserdampf
Wärmewasser
Schmelzerei
Betriebseinheit 12.3
15.01.90
Edbauer 558
Filteranlage
Emissions-Quelle Nr. 161
Zur Betriebseinheit 12.5
Ind.Tiegelspeicheröfen
Zur Betriebseinheit 12.2 Bl.1
Von Betriebseinheit 12.2 Bl.1
Von Betriebseinheit 12.2 Bl.1
Kupferzusatz
Molybdänzusatz
Von Betriebseinheit 12.1
Von Betriebseinheit 12.2 Bl.1
Flüssigeisen zu den Form- u. Gießanlagen
Ofenausbruch Zur Deponie
Schlacke Zur Deponie
Stampfmasse
BE 12-3A


Schmelzerei
Betriebseinheit 12.2 Blatt 1
15.01.90
Edbauer 558
Kühlwasserversorgung
Kupolofen – Düsen
Kupolofen – Mantel
Schlackengranulierung
Kupolofenanlage
1 Kupolofen
2 Ind.Rinnenöfen
Von Betriebseinheit 12.1
Emissions-Quelle Nr. 163
Zur Betriebseinheit 12.2 Bl.2
Gichtgas
Von Betriebseinheit 12.2 Bl.2
Heißwind
Sauerstoff
50 to/h
Stampfmasse
Ofenausbruch Zur Deponie
Ind.Rinnenofen Inhalt 120 to
Zur Betriebseinheit 12.3
Von Betriebseinheit 12.3
Zur Betriebseinheit 12.3
Zur Betriebseinheit 12.3
Flüssigeisen zu den Form- u. Gießanlagen, Konverteranlage
Kühluft
Luft
Wasserdampf
Werkswasser
Werkswasser-Rückkühlkreislauf
Schlacke zur Deponie oder Wiederverwertung
BE 12-2 1A

Staubentsorgung



Schmelzerei AuG
Werk Singen
Betriebseinheit 12.5

15.01.90 Edbauer 558

BE12-5A

Legende zu Fließbilder der Betriebseinheiten 12.1 bis 12.5

- Chargen für Kupolofen
- Chargen für NF-Ind.Tiegel-speicherofen
- Flüssigeisen
- Gichtgas, Erdgas
- Abgas aus Verbrennung, ungereinigt
- Abgas aus Verbrennung, gereinigt
- Staub, Schlacke, Ofenausbruch
- Kreislauf- u. Werkswasser
- Kreislaufwasser u. Kupolofenschlacke
- Kaltwind, Verbrennungsluft, sek. Verbrennungsluft, Kühlluft
- Heißwind
- Abgase zu Filter 55, ungereinigt
- Abgase zu Filter 55, gereinigt
- 34.2 Stoffstrom-Nr. (Formulare)
- (28) Pos.Nr. laut Beschreibung GHW

Schmelzerei

Legende zu Fließbilder

15.01.90 Edbauer 558