Untersuchung zum Thema:

Vermeidung von Abfällen durch abfallarme Produktionsverfahren

Reststoffe aus Induktionsofenschmelzanlagen für Gußeisen

im Auftrag des
Umweltministeriums Baden-Württemberg

Wolfgang Binninger

Fichtner GmbH & Co. KG
Sarweystraße 3
70191 Stuttgart
Tel. 07 11 / 89 95-0

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 Induktionsofen-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**	6
1	**Einführung**	10

Teil A – Stand der Induktionsofenschmelztechnik für Gußeisen

2	**Grundlagen der Induktionsofenschmelztechnik für Gußeisen**	12
2.1	Übersicht zur Eisenmetallerschmelzung und Gußeisenwerkstoffe	12
2.1.1	Einteilung der Metalle in Gießereibetrieben	12
2.1.2	Gußeisenwerkstoffe	13
2.1.2.1	Gußeisen mit Lamellengraphit (GGL)	14
2.1.2.2	Gußeisen mit Kugelgraphit (GGG)	14
2.1.2.3	Temperguß (GT)	15
2.2	Schmelz- und Warmhalteaggregate	15
2.2.1	Einsetzbare Ofenarten in Schmelzbetrieben für Eisenguß	15
2.2.2	Einteilung der Induktionsöfen	15
2.2.3	Grundgesetze und Verfahrensprinzipien des Induktionsofens	19
2.3	Metallurgie in Induktionsöfen	21
2.4	Ofenbetrieb und Betriebsweise	23
2.5	Ofenzustellung	27
3	**Abfallarten – Entstehung, Aufkommen und Entsorgungsweg**	30
3.1	Induktionsofenschlacke	30
3.2	Rinnenofenschlacken	31
3.3	Stäube	31
3.4	Tiegel- und Vergießofenausbrüche	32
4	**Vermeidung und Verwertung von Abfällen aus Induktionsofenschmelzanlagen für Gußeisen**	34
4.1	Vermeidung von Schlacken, Stäuben und Ofenausbrüchen aus Induktionsofenschmelzanlagen	36
4.2	Aufbereitung der Reststoffe	38
4.2.1	Aufbereitung von Schlacken	38
4.3	Verwertung der Reststoffe aus Induktionsofenschmelzanlagen	39
4.3.1	Erarbeitung bundeseinheitlicher Regelungen für die Verwertung von Reststoffen	39
4.3.2	Verwertung von Schlacken	40
4.3.3	Verwertung von Stäuben	40
4.3.4	Verwertung von Ofen- und Tiegelausbrüchen	41

Teil B – Ist-Analyse des untersuchten Betriebes

5	**Beschreibung des untersuchten Betriebes**	42
5.1	Leistungsangebot	42
5.2	Mitarbeiter	42
5.3	Gebäude und Lager	42
5.4	Maschinelle, apparative und sonstige Ausstattung	44
5.5	Ablauf der Arbeiten	46
6	**Stoffbilanzen**	50

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

7	**Bereits durchgeführte Maßnahmen zur Vermeidung und Verwertung von Abfällen/Reststoffen**	63
7.1	Einsatz von sauberen Einsatzmaterialien	63
7.2	Ofenausbruchtrennung	63
7.3	Getrennthaltung der Grob- und Feinstäube	63
7.4	Oxidierende Einsatzstoffe abdecken	64
7.5	Schmelzöfen geschlossen fahren	64
7.6	Optimierte Fahrweise mit geringer Überhitzung	64
7.7	Widerstandsfähige Ausmauerungen und Tiegel	64
8	**Konzepte zur Vermeidung und Verwertung weiterer Abfälle/Reststoffe**	65
8.1	Vermeidung durch Umstellung von Netzfrequenz- auf Mittelfrequenzschmelzöfen	65
8.2	Verbesserte Abschlacktechniken	65
8.3	Zusammenführen der Schlacken und Stäube aus verschiedenen Gießereibetrieben	65
8.4	Eindüsen der Stäube in Kupolöfen	65
8.5	Wiedereinschmelzen der Stäube in Hüttenwerken	65
9	**Entscheidungskriterien zur Durchführung von Maßnahmen zur Vermeidung und Verwertung von Abfällen**	66
9.1	Vermeidungs- und Verwertungspotentiale	66
9.2	Technische Realisierbarkeit und Zumutbarkeit	66
9.3	Organisatorische Integration und Akzeptanz	66
9.4	Bewertung der Wirtschaftlichkeit	67
9.5	Entsorgungskosten	67

Literaturverzeichnis . . . 69

Abbildungsverzeichnis . . . 73

Tabellenverzeichnis . . . 73

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. Bei einer durchschnittlichen Ausbringung von 60 % Guß entspricht dies einer Schmelzleistung von ca. 860 000 t flüssigem Eisen. Die erzeugte Menge entspricht etwa 15 % der Gesamtmenge in der alten Bundesrepublik. Ungefähr die Hälfte der Gesamtproduktion an Gußeisen in Baden-Württemberg wird in Induktionsöfen erschmolzen. Jährlich müssen etwa 40 000 t Schlacken aus Schmelzanlagen der Eisengießereien entsorgt werden. Die aus Induktionsofenschmelzanlagen zu entsorgende Menge wird auf 10 000 t geschätzt.

Der Bericht beschreibt den Stand der Technik zur Vermeidung und Verwertung von Induktionsofenschlacken sowie der sonstigen wesentlichen Abfälle/Reststoffe (Teil A) und einen untersuchten Induktionsofenschmelzbetrieb (Teil B und C).

In **Induktionsofen-Schmelzanlagen** wird das Gußeisen aus eisenmetallischen Einsatzstoffen, Legierungszuschlägen und Schmelzhilfsmitteln unter Verwendung von elektrischer Energie erschmolzen und in den Formanlagen der Gießereien zu Gußprodukten vergossen. In den Induktionsöfen werden Gußeisen mit Lamellengraphit (GGL), Gußeisen mit Kugelgraphit (GGG), Temperguß (GT) und Stahlguß (GS) erschmolzen.

Induktionsöfen werden in vielen Betrieben, insbesondere bei Großserien, auch als Speicheröfen eingesetzt. Das Schmelzen erfolgt dann im wirtschaftlich günstigeren Kupolofen. Man spricht dann vom **Duplexbetrieb**. Zum Speichern großer Mengen kommen Induktionsrinnenöfen zum Einsatz. Tiegelöfen übernehmen dann aus den Speicheröfen die Schmelze zur Einstellung der Gießtemperatur und der werkstoffbezogenen Stoffzusammensetzung. Solche Großanlagen bestehen aus:

Schmelzofen	: Induktionsofen mit großem Fassungsvermögen oder Kupolofen
Speicherofen	: Induktions-Rinnenofen
Gießvorbereitungsaggregat	: Tiegelofen

Als **Einsatzstoffe** werden **Eisenträger** wie Roheisenbarren, Gußbruch, Stahlschrott, Kreislaufmaterial, Späne und Spänebriketts sowie Blechpakete (teilweise verzinkt) verwendet. Außerdem kommen **Legierungszuschläge** wie z. B. Aufkohlungsmittel, Ferromangan, Ferrosilizium, Ferrochrom usw. zum Einsatz. Als **Energien/Hilfsstoffe** werden Strom, Kühlwasser und feuerfeste Baustoffe (z. B. Stampfmassen) verwendet.

Der **Arbeitsablauf** in den Schmelzanlagen beginnt mit der Gattierung, in der die spezielle Rezeptur für die vielfältigen Gußeisenvarianten aus den Einsatzstoffen zusammengestellt und den Induktionsöfen zugeteilt wird. Die Gattierung wird niedergeschmolzen. Nach Erreichen der Abstichtemperatur wird das Flüssigeisen von der Schlacke getrennt und anschließend vergossen. Die staubhaltige Abluft über den Schmelzöfen, den Gattierungplätzen und den Trocknern wird abgesaugt und in Filteranlagen gereinigt.

Die wichtigsten Ofenbauarten für Induktionsöfen sind der **Netzfrequenz-, Mittelfrequenz-Induktionstiegel- und der Induktions-Rinnenofen.** Die nachfolgende Tabelle zeigt einige wesentliche charakteristische Parameter dieser Ofenarten.

	Schmelzöfen		Warmhalteöfen
Parameter	**Netzfrequenz**	**Mittelfrequenz**	**Rinnenofen (Netzfrequenz)**
1 Frequenzen Hz	50–60	250–4 000	50
2 Fassungsvermögen t	1–60	0,5–10	1–120
3 Leistungsdichte kW/t	bis ca. 300	bis ca. 1 000	bis ca. 100
4 Badbewegung	stark	normal	nein
5 Einsatz beim Anfahren	Block oder flüssig	kleinstückiges Material	–
6 Anfahrverhalten	langsam	schnell	–
7 Flexibilität	niedrig	hoch	sehr niedrig
8 Anwendungsgebiete	• 1–3-Schichtbetrieb • Schmelzen kleiner bis großer Gußmengen • Duplex-Betrieb	• 1–3-Schichtbetrieb • Schmelzen geringerer bis mittlerer Gußmengen	• Warmhalten • Speichern • Puffer
9 Werkstoffsorten	GGL; GGG; GT	GGL; GGG; (GT); GS	GGL; GGG; (GT)
10 Reststoffmengen	• abhängig von der Arbeitsweise relativ große Mengen durch längere Einschmelzzeiten	• abhängig von der Arbeitsweise relativ geringe Mengen durch kurze Einschmelzzeiten	Sehr geringe Mengen durch geschlossene Betriebsweise unter reduzierender Ofenatmosphäre

Tab. 0-1: Charakteristische Parameter der in Induktions-Schmelzanlagen bevorzugt eingesetzten Ofenbauarten

Die wichtigsten **Abfallarten** aus Induktionsschmelzanlagen sind die **Schlacken** aus den Öfen, **Stäube** aus der Abluft sowie **Ofenausbrüche** aus Tiegel- und Rinnenofen.

Die **Vermeidung** von Reststoffen ist durch Verfahrensumstellung von Netzfrequenz- auf Mittelfrequenzöfen möglich. Außerdem können durch den Einsatz sauberer Einsatzstoffe, Verringerung der Überhitzungszyklen, Reduzierung der oxidierenden Ofenatmosphäre, die Wahl von beständigen Ofenausmauerungsmaterialien sowie EDV-Steuerung der Anlage Reststoffe vermieden werden. Ein allgemeingültiges Vermeidungspotential ist nicht exakt quantifizierbar, weil die wechselseitigen Auswirkungen der verschiedenen Verfahrensmodifikationen, das Alter der Anlage, die Fahrweise, die zu erschmelzende Werkstoffsorte sowie die Qualifikation des Betriebspersonals berücksichtigt werden müssen.

Voraussetzung zur Verwertung ist die Kenntnis der Zusammensetzung sowie der technologischen Eigenschaften der Reststoffe. Deshalb sind von allen Reststoffen chemische Untersuchungen durchzuführen und technologische Gutachten zu erstellen, deren Ergebnisse in einem **Stoffsteckbrief** zusammengefaßt werden. Abnehmern und Vermittlern von diesen Reststoffen werden damit Entscheidungshilfen hinsichtlich eines Verwendungsgebietes in die Hand gegeben.

Eine geeignete **Aufbereitung** der Reststoffe ist Voraussetzung zur Verwertung. Viele Reststoffe können in der Form, wie sie in den Schmelzanlagen anfallen, nicht direkt einer Verwertung zugeführt werden.

Das getrennte Sammeln der verschiedenen Reststoffe ist Voraussetzung zur Verwertung. Die **Verwertung der Schlacken als Hauptreststoff einer Induktionsofenschmelzanlage** ist z. B.

im Straßenbau als Unterbaumaterial oder in der Bauindustrie für Fertigbauteile möglich. Voraussetzung für den Einsatz ist der Nachweis der Umweltverträglichkeit. Zudem muß in Aufbereitungsanlagen eine definierte Qualität eingestellt werden, die sich an den Standards und Anforderungen der einschlägigen Richtlinien und Merkblättern der Fachverbände zu orientieren hat. Die Aufbereitungskosten sollten die Preise für Naturbaustoffe nicht übersteigen, damit der Markt das Verwertungsprodukt akzeptiert. Die Verwertung der Stäube ist durch Eindüsen in Kupolöfen und Hochöfen möglich. Die Wiedereindüsung der Stäube in die betriebseigenen Öfen sollte untersucht werden.

Der Anfang 1991 **untersuchte Betrieb** stellt im wesentlichen hochwertige kleinere Gußprodukte in großen Stückzahlen vor allem für die Automobilindustrie her. In dem Betrieb wurden im Betriebsjahr 1989 etwa 3 870 t guter Guß erzeugt. In der Schmelzanlage sind 11 Mitarbeiter im 3-Schicht-Betrieb beschäftigt.

Im untersuchten Betrieb werden **bereits folgende Maßnahmen zur Vermeidung und Verwertung von Reststoffen durchgeführt:** Reinigung der Einsatzstoffe, Getrennthaltung phosphorarmer von phosphorreicher Schlacke, Grob- und Feinstaubtrennung, Trennung der Ofenausbrüche aus Tiegel- und Rinnenöfen und Einsatz von beständigen Ofenausmauerungen. Schlackezerkleinerungsversuche sind begonnen worden. Erste Kontakte zu möglichen Verwertern aus dem Straßenbau sind aufgenommen worden, führten aber bisher noch nicht zur Verwertung der Reststoffe.

Die **Kosten** der Deponierung betrugen im Untersuchungszeitraum für **Schlacken** 55 DM/t, für Stäube und Ofenausbrüche ca. 80 DM/t. Alle Abfälle konnten auf der Hausmülldeponie entsorgt werden. In Zukunft ist zu erwarten, daß sich die Entsorgungskosten der Stäube und Ofenausbrüche, soweit es sich um besonders überwachungsbedürftige Abfälle handelt, auf 300 bis 1 000 DM/t erhöhen werden. Aber auch die Kosten zur Ablagerung der Schlacken auf Hausmülldeponien werden mittelfristig auf etwa 200 bis 300 DM/t steigen.

Weitere Maßnahmen zur Vermeidung und Verwertung von Abfällen im untersuchten Betrieb sind der Einsatz von Mittelfrequenz- anstelle von Netzfrequenzöfen. Dabei kann sich neben der günstigeren Fahrweise (kein Nachtbetrieb, weil Öfen abends abgeschaltet werden) auch eine Verringerung der Reststoffmengen ergeben. Es sind Untersuchungen durchzuführen zum Wiedereindüsen der Stäube in externe Kupolöfen zur Wiedergewinnung der Eisenanteile und Einbindung der mineralischen Anteile in die Schlacken. Ebenso besteht die Möglichkeit, die eisenhaltigen Stäube bei der Roheisenerzeugung dem Sinter für den Hochofen zuzusetzen.

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht zur Vermeidung, Behandlung und stofflichen Verwertung für die wesentlichen in Induktionsofenschmelzanlagen anfallenden Abfallarten wieder.

Abfall-/Reststoffart und Verwertungspotential in Prozent	Generelle Vermeidung (für alle Abfälle/Reststoffe)	Behandlungsmaßnahmen	Stoffliche Verwertung/Einsatzgebiete
Schlacken aus Induktionsöfen (60–90)	Vermeidungsmaßnahmen sind: – saubere Einsatzstoffe – Oxidierende Stoffe abdecken – Reduzierende Ofenatmosphäre – Geschlossene Ofenfahrweise – Unnötige Überhitzung vermeiden – Unnötige Wartezeiten bis zum Vergießen vermeiden – angepaßtes Handling (z. B. Einsatz von Schlackenbindemitteln) – Netzfrequenzöfen durch Mittelfrequenzöfen ersetzen, dadurch flexible Fahrweise, bei geeigneter Arbeitsweise – angepaßte Ausmauerungen und Tiegel	– Zerkleinerung – Getrennthaltung	– Straßenbau* (z. B. Unterbaumaterial) – Beimengung zu natürlichen Mineralstoffen* – Bauindustrie* (z. B. Fertigbauteile)
Schlacken aus Rinnenöfen (60–90)		– Zerkleinerung – Getrennthaltung	– Einsatz wie Induktionsofenschlacke – Wiedereinsatz in Hochöfen zur Nutzung der Eisenanteile
Ofen- und Tiegel-Ausbrüche (0–50)		– Zerkleinerung	– Bisher keine Verwertung
Filterstäube (10–50)	Vermeidungsquoten sind abhängig von: – spezifischer Leistung der Anlage (moderne Anlagen) – Produktpalette – erforderlicher Technologie bzw. Produktionsverfahren – Personalqualifikation – Betriebsweise Die Vermeidung von Reststoffen ist möglich in dem Bereich von 5 bis 25 %.	– Inertisierung – Getrennthaltung	– Verfestigung/Pelletierung und Wiedereinsatz in Hochöfen – Wiedereindüsung in Kupolöfen* – Eindüsung in betriebseigene Induktionsöfen*

* Untersuchungsbedarf

Tab. 0-2: Übersicht zur Vermeidung, Behandlungsmaßnahmen und Verwertungsmöglichkeiten für Abfälle/Reststoffe aus Induktionsofen-Schmelzbetrieben

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. Der Hauptanteil sind die nicht- und niedriglegierten Gußsorten (GGL und GGG). Die größte Bedeutung hat in der Bundesrepublik das Gußeisen mit Lamellengraphit (GGL) mit ca. 70–75 %. Dem folgt Gußeisen mit Kugelgraphit (GGG) mit etwa 10–15 %. Der Rest verteilt sich auf den Temperguß und den Stahlguß. Das Erschmelzen erfolgt vor allem in Kupolöfen sowie Induktionstiegelöfen.

In Baden-Württemberg sind viele Gießereien in Betrieb, die ihre Einsatzstoffe zum Teil aus der Hochofenindustrie und vor allem aus dem Schrottrücklauf erhalten.

In der Bundesrepublik produzierten 1989 etwa 900 Betriebe 4,1 Mio. t 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 % 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 Guß verbraucht.

In Baden-Württemberg fallen ca. 40 000 t Schlacken aus Schmelzanlagen von Eisengießereien an. Davon entfallen etwa 10 000 t Schlacken aus Induktionsofenanlagen. Diese Menge ist abgeleitet aus den spezifischen Schlackenmengen, da sie sich aus den statistischen Erhebungen nicht herleiten läßt.

Die wichtigsten Abfall-/Reststoffarten aus den Induktionsofenbetrieben sind:

Reststoff-/Abfallart	Abfallschlüsselnummer
– Elektroofenschlacken	31 218
– Eisenhaltiger Staub ohne schädliche Beimengungen	35 101
– Ofenausbruch aus metallurgischen Prozessen	31 103
– Ofenausbruch aus metallurgischen Prozessen mit schädlichen Verunreinigungen	31 108*

* besonders überwachungsbedürftiger Abfall

Die Schmelzanlagen sind nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) genehmigungsbedürftig.

Im Bereich der Reststoffe aus Induktionsschmelzanlagen sind nur geringe Vermeidungs- und Verwertungsaktivitäten festzustellen. Forschungsberichte und Untersuchungen zur Vermeidung und Verwertung von Schlacken aus Induktionsöfen liegen nur in geringer Zahl vor. Dies liegt vor allem daran, daß Schlacken aus Induktionsöfen bisher kostengünstig deponiert werden konnten. Insbesondere stellen die Schlacken nach den bisherigen Erkenntnissen keine Gefahr für Mensch und Umwelt dar. Die Schlacken sind weitgehend inert.

Es kann davon ausgegangen werden, daß ein Großteil der Schlacken aus Induktionsschmelzanlagen nach geeigneter Aufbereitung als Sekundärrohstoff z. B. im Straßenbau wieder verwertet werden kann. Für Ofenausbrüche sind noch keine Verwertungsmöglichkeiten bekannt.

Probleme bei der Verwertung bereiten die oft zu geringen Reststoffmengen der einzelnen Betriebe. Weiterreichende Untersuchungen zur Nutzung der Schlacken sind erforderlich. Der gemeinsame Absatz von Schlacken verschiedener Betriebe ist anzustreben. Da die Reststoffe aus Schmelzanlagen mengenmäßig bisher nicht die Beachtung fanden wie andere Reststoffe (z. B. Altsande), liegen häufig Informationsdefizite über technische und organisatorische Möglichkeiten zur Vermeidung und Verwertung dieser Reststoffe/Abfälle vor.

Das Ziel dieser Untersuchung ist es, ausgehend vom Stand der Technik Maßnahmen aufzuzeigen, die zu abfallarmen Produktionsverfahren in Induktionsschmelzbetrieben führen. Die Abb. 1.1 gibt einen Überblick der grundsätzlich möglichen Vermeidungs- und Verwertungsmaßnahmen in einer Induktionsofenschmelzanlage.

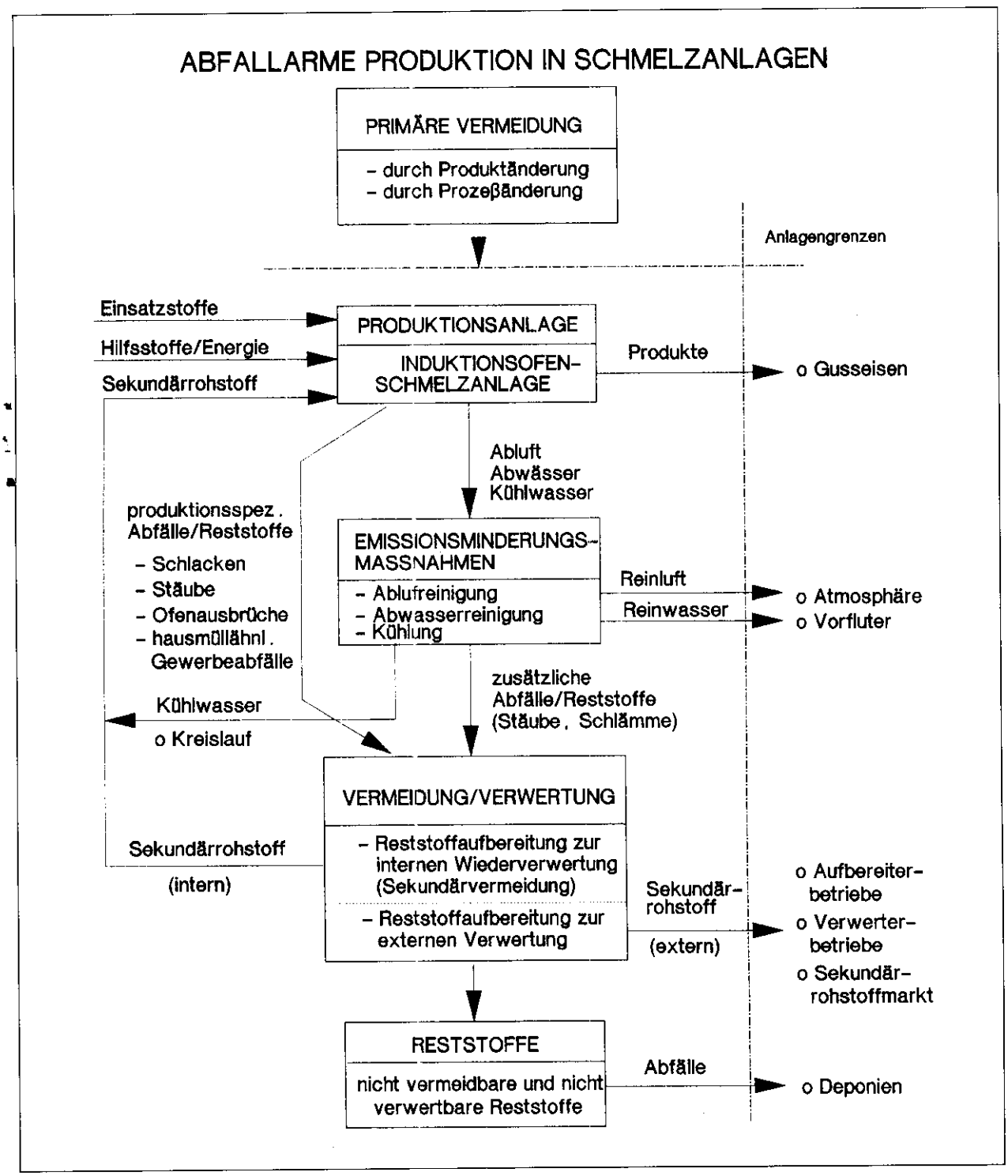


Abb. 1-1: Möglichkeiten der Vermeidung und Verwertung in einer Induktionsofen-Schmelzanlage

Teil A – Stand der Induktionsofenschmelztechnik für Gußeisen

2 Grundlagen der Induktionsofenschmelztechnik für Gußeisen

2.1 Übersicht zur Eisenmetallerschmelzung und Gußeisenwerkstoffe

Zum Verständnis von Induktionsschmelzanlagen sind Kenntnisse über

1) die wichtigsten Gußeisensorten,
2) die zum Einsatz kommenden Schmelzaggregate,
3) die Verfahrensprinzipien und Grundgesetze der Induktionsofen-Schmelzanlage,
4) die Metallurgie,
5) den Induktionsofenschmelzbetrieb mit seinen Anlagen-Komponenten,
6) die Ofenzustellung bzw. feuerfeste Auskleidung von Schmelzaggregaten

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 hochschmelzende 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. Zugfestigkeit), 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.

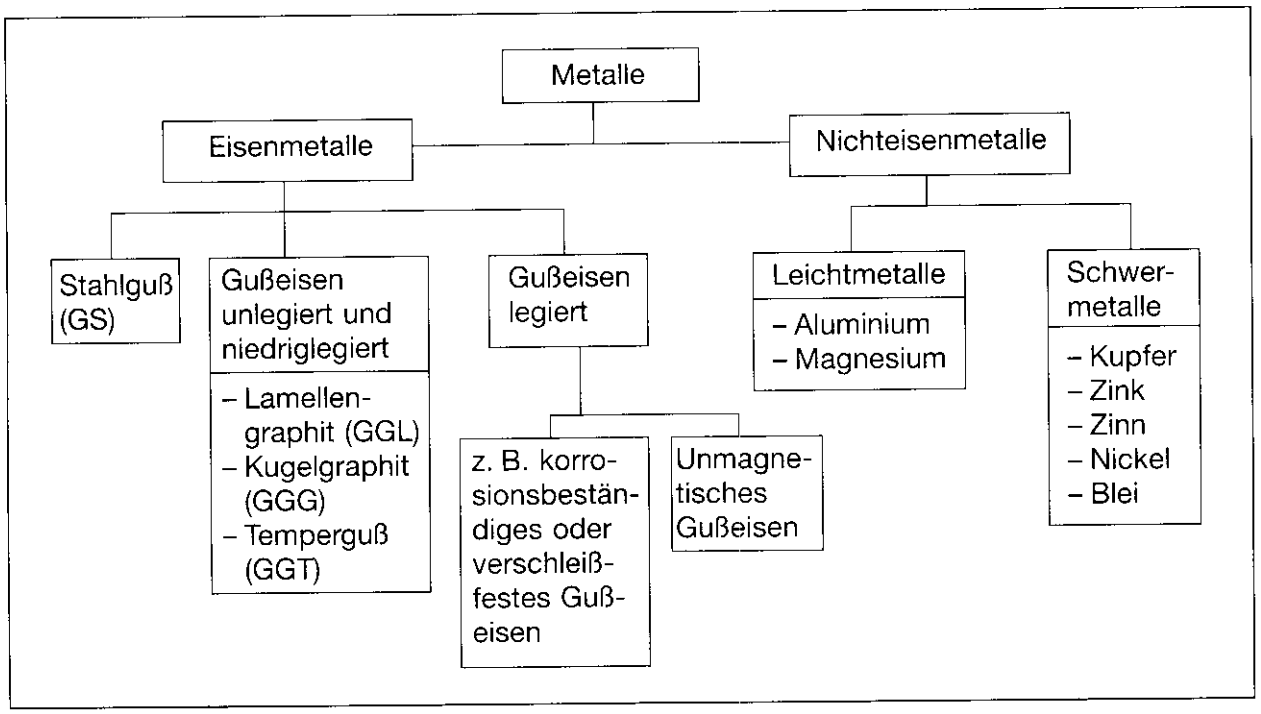


Abb. 2-1: Einteilung und Übersicht der wichtigsten Schmelzprodukte in Gießereibetrieben

Gießereibetriebe

Die Gießereien werden unterschieden nach der Art der eingesetzten Form- und 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 wesentlichen 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 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, 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 Ku-

gelgraphit 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. 1,2 bis 1,5 %; Mangan von ca. 0,5 % erfährt dagegen eine Zerfallsglühung in neutraler Ofenatmosphäre. Diese Gußsorte hat auch 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 Einsetzbare Ofenarten in Schmelzbetrieben für Eisenguß

In den letzten Jahren fand ein deutlicher Wandel von den brennstoffbeheizten zu elektrisch betriebenen Schmelzeinrichtungen nach dem Induktionsprinzip statt. Gründe dafür waren die bessere Verfügbarkeit von elektrischer Energie, fallende Strompreise, wirtschaftlich arbeitende Schmelz- und Warmhalteöfen sowie die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten der elektrischen Aggregate. Bei großen Schmelzanlagen kommen jedoch verstärkt wieder Kupolöfen zum Einsatz.

In Induktionsschmelzanlagen kommen die folgenden Ofenarten zum Einsatz:

- Trocken- und Vorwärmöfen
- Netzfrequenz-Induktionstiegelöfen
- Mittelfrequenztiegelöfen
- Induktionsrinnenöfen

Trocken- und Vorwärmöfen
Trocken- und Vorwärmöfen werden bei Bedarf 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.

2.2.2 Einteilung der Induktionsöfen

Beim induktiven Schmelzen und Warmhalten von Metallen werden durch elektromagnetische Wechselfelder Wirbelströme in dem zu schmelzenden Eisen erzeugt, das sich aufgrund seines

elektrischen Widerstandes erwärmt. Man unterscheidet dabei zwischen dem Induktionstiegelofen mit einem Magnetkern und dem Induktionsrinnenofen.

Induktionstiegelöfen werden vor allem als Netzfrequenz-(NF-) und als Mittelfrequenz-(MF-)öfen betrieben. Die anderen Induktionstiegelofenvarianten wie z.B. der Trifrequenzinduktionstiegelofen kommen je nach Art der betrieblichen Anforderungen gelegentlich zur Anwendung.

Netzfrequenz-Induktionstiegelofen

Generell sind beim Schmelzen im Netzfrequenz-Induktionstiegelofen nur wenige Einschränkungen hinsichtlich der zu erzeugenden Qualitätspalette zu machen, da vom Stahl bis zum Gußeisen jede gewünschte Gußqualität, ob Stahl-, Temper- oder Grauguß, erschmolzen werden kann. In der Regel wird auch Stahlschrott eingesetzt, da er preiswerter als z. B. Roheisen ist. Der zu schmelzende Metalleinsatz bzw. die warmzuhaltende Schmelze befinden sich in einem Tiegel.

Netzfrequenzöfen sind relativ unflexibel zu fahren, da sie bei jedem Wechsel aufwendig mit Sumpf angefahren werden müssen. Sie sind nur wirtschaftlich zu betreiben, wenn größere Mengen derselben Gußarten zu erschmelzen sind.

Das Anfahren, also die Inbetriebnahme, muß mit flüssigem Sumpf oder mit einem Anfahrblock erfolgen. Der Sumpfanteil sollte für den laufenden Betrieb 45 bis 50 % nicht unterschreiten. Als untere Grenze wird die 30-%-Marke angesehen, da beim Nachchargieren andernfalls die Gefahr des Einfrierens besteht und die Leistungsaufnahme stark zurückgeht. Die volle Leistungsnutzung wird ab einem Füllgrad von 65 bis 70 % erreicht.

Der mit Netzfrequenz (50 Hz) betriebene Induktionstiegelofen benötigt keine Umrichter oder Frequenzwandler. Da die Eindringtiefe der induzierten Wirbelströme bei niedriger Betriebsfrequenz wesentlich größer als bei Mittelfrequenz ist, werden NF-Induktionstiegelöfen erst mit einem Fassungsvermögen ab 800 kg Eisen oder Stahl wirtschaftlich betrieben. Da außerdem die Badbewegung bei Netzfrequenzbetrieb sehr intensiv ist, ist auch die installierte spezifische Leistung entsprechend zu begrenzen.

Bei Netzfrequenztiegelöfen begrenzt die Badüberhöhung (siehe Abschnitt 2.2.3) die Leistungsdichte auf etwa 330 kW/t. Das Anwendungsgebiet erstreckt sich hier auf Öfen mit einem Fassungsvermögen von ca. 1 bis 60 t. Diese Öfen eignen sich vorwiegend als Schmelzöfen, aber auch als Warmhalte- und Vergießöfen, desgleichen zum Speichern und Duplizieren.

Der Aufbau eines Netzfrequenz-Induktionstiegelofens wird in Abbildung 2-2 dargestellt.

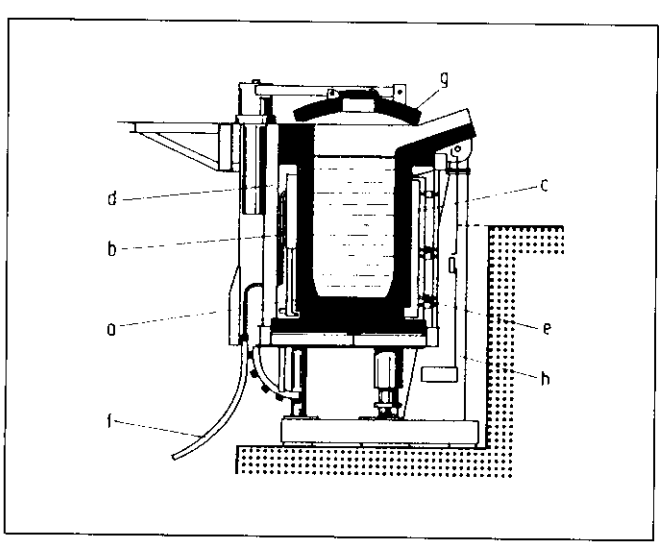


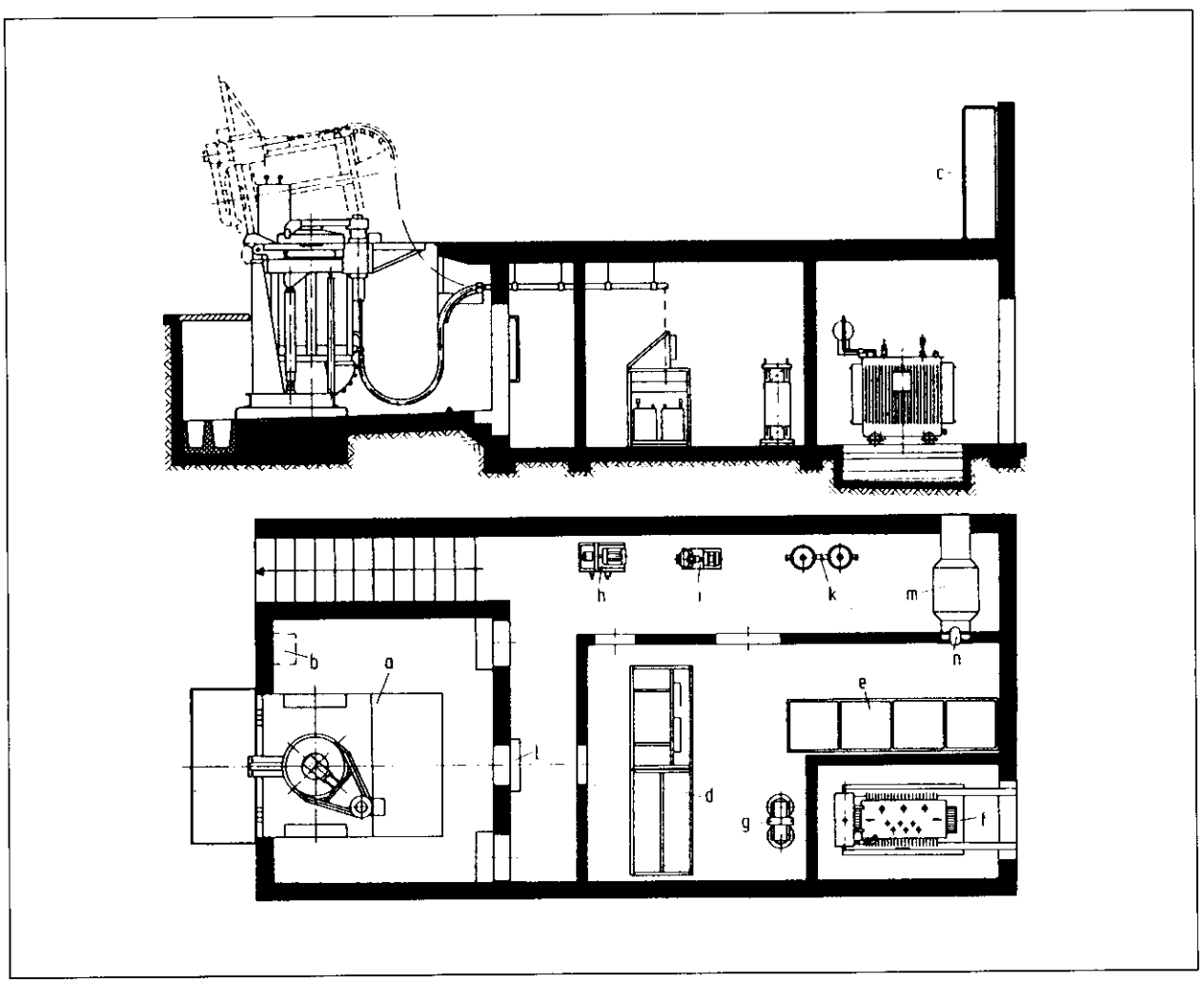
Abb. 2-2: Aufbau eines Induktionstiegelofens

a: Keramischer Tiegel, b: Kupferspule, c: Blechpakete (Joch), d: Gestell (Profilstahl), e: Spannvorrichtung, f: wassergekühlte Kabel, g: Deckel, h: Schutzverkleidung
(Quelle: Brokmeier)

Mittelfrequenz-Induktionstiegelofen
Tiegelöfen, die mit Mittelfrequenz betrieben werden, haben den Vorteil, daß sie kalt angefahren und nach dem Schmelzen vollständig entleert werden können; ein Legierungswechsel ist somit jederzeit möglich, desgleichen sind auch Schmelzbehandlungen jeder Art durchführbar. Das Einsatzgut kann um so kleinstückiger sein, je höher die Frequenz gewählt wird.

Der Mittelfrequenzbereich bei Induktionstiegelöfen reicht bis etwa 10 000 Hz, wobei aber nur der Bereich von 250 bis 4 000 Hz für Öfen im Gießereibetrieb Bedeutung hat. Umrichter bzw. Schwingkreisumrichter wandeln die 50-Hz-Leistung des Drehstromnetzes in die erforderliche Mittelfrequenzleistung um.

Die Abbildung 2-3 zeigt den Aufbau einer Mittelfrequenzgesamtanlage. Der Ofenaufbau ist dem des NF-Ofens sehr ähnlich.



a: MF-Tiegelofen, b: Steuerpult, c: Schaltschrank, d: Kondensatorgerüst, e: Thyristorumrichter, f: Transformator, g: Drossel, h: Hydraulikaggregat, i: Wasserpumpe, k: Wasserrückkühler, l: Kühlwasserüberwachung, m: Luftfilter, n: Ventilator (Quelle: Brokmeier)

Abb. 2-3: Aufbau einer Gesamtanlage bzw. Aufstellungsplan für Mittelfrequenz-Tiegelöfen

Da bei Mittelfrequenz die maximale spezifische Leistung erhöht werden kann, verringern sich die Einschmelzzeiten für einen Ofen mit gleichem Tiegelinhalt entsprechend (Abbildung 2-4). Der elektrische Wirkungsgrad – bezogen auf den gleichen Tiegelinhalt – verbessert sich nur wenig. Die, wenn auch geringen, Verluste des zusätzlich benötigten Umrichters (Frequenzwandler) werden durch die verkürzte Einschmelzzeit (geringere Ofenverluste) in etwa kompensiert.

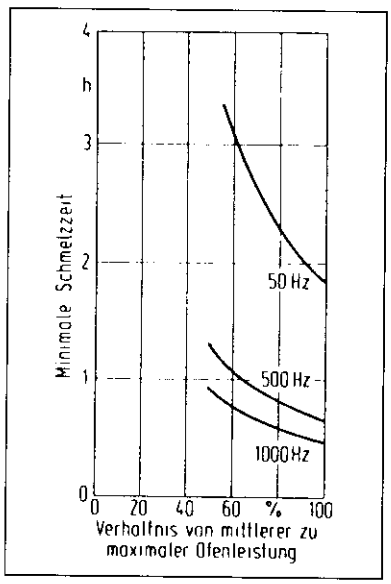
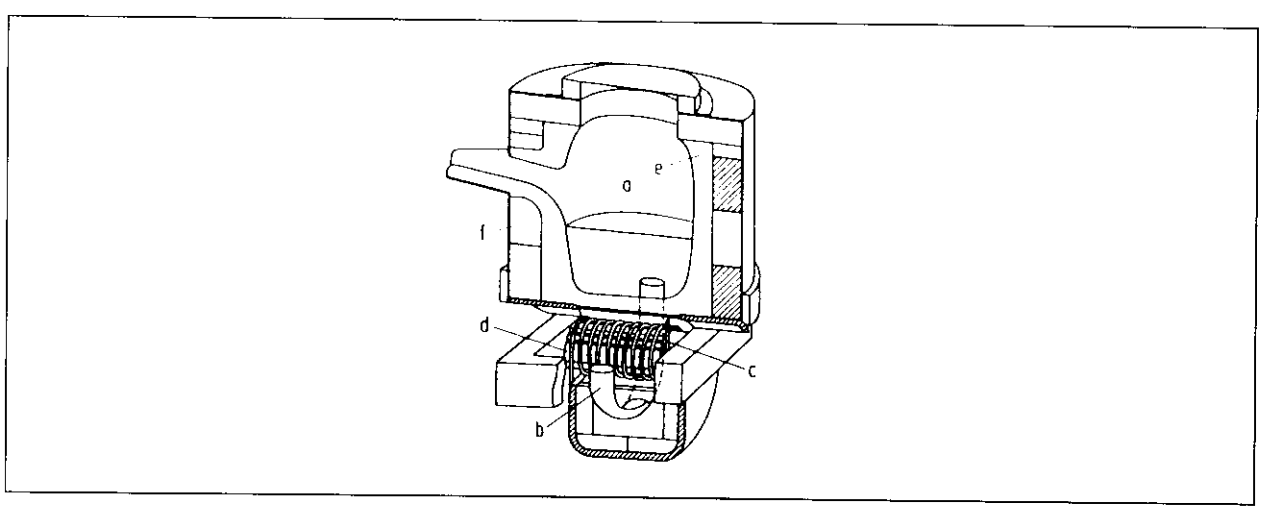


Abb. 2-4:
Minimale Schmelzzeit (ohne Nebenzeiten) für das Aufschmelzen von Gußeisen
(gültig für einen bis zu 25 % über Spulenoberkante gefüllten Tiegel abhängig von Frequenz und mittlerer Leistung zu maximaler Leistung δ)
(Quelle: Brokmeier)

Induktionsrinnenofen
Die Anwendungsgebiete des Induktionsrinnenofens sind:

- Warmhalten des Flüssigeisens
- Puffer zwischen Schmelz- und Gießbetrieb
- Kapazitätserhöhung der Gußproduktion durch Vorschmelzen in einem Schmelzofen und Auffüllen außerhalb der Gießzeit
- Überhitzung
- Einhaltung konstanter Gießbedingungen, auch bei Betriebsunterbrechungen (Quasikontinuität)

Das Prinzip des induktiv beheizten Rinnenofens geht aus der Abbildung 2-5 hervor. Unterhalb des eigentlichen Ofenspeichers ist der Induktor angeordnet. Er besteht aus einer mit flüssigem Eisen durchströmten Rinne, welche die Sekundärspule des Trafosystems bildet. Die Rinne wird um die eigentliche Primärspule geführt. Das Magnetfeld arbeitet wegen der Führung über ein Joch relativ verlustarm. Die Energiebeaufschlagung der Induktoren, die meist mit einem Magnesitfutter (auch mit Al_2O_3) ausgekleidet sind, reicht bis zu 2 000 kW; häufig in der Praxis eingesetzt werden Aggregate mit 500 bis 800 kW. Rinnenöfen werden im allgemeinen mit Netzfrequenz betrieben.



a: Sammelgefäß, b: Schmelzrinne, c: Primärspule, d: Trafokern, e: Stampfmasse, f: Isolierung

Abb. 2-5: Netzfrequenz-Induktionsrinnenofen mit geschlossener Rinnenführung

Heute wird ausschließlich die geschlossene Rinnenführung angewandt. Der Induktionsrinnenofen eignet sich speziell zum Speichern einer einzigen Legierung, die laufend vergossen wird, desgleichen als Warmhalte- und Gießofen sowie zum Duplizieren von Gußeisen, da hier eine Flüssigbeschickung durch das vorgeschaltete Schmelzaggregat, z. B. Kupolofen oder Induktionstiegelofen, gesichert ist.

Das Speichergefäß wird meist mit einem feuerfesten Futter auf Al_2O_3-Basis ausgekleidet, das eine Haltbarkeit von mehreren Jahren hat. Das Fassungsvermögen liegt im Bereich von 20 bis 150 t; für mittlere bis größere Gießereien haben sich Speichergefäße mit einem Nutzinhalt von 30 bis 40 t als besonders geeignet erwiesen. Die durch die induktive Energieübertragung hervorgerufene Badbewegung ist gering.

Der Ofen darf im allgemeinen nur bis auf einen Mindest-Sumpf entleert werden. Während des Betriebs ist darauf zu achten, daß der Eisenpegel nicht bis unter die Siphonverschlüsse absinkt, da ansonsten ein Lufteinbruch erfolgt, der die inzwischen aufgebaute reduzierende Gasatmosphäre zerstört. Aus dem gleichen Grunde soll auch der Ofen solange wie möglich (2 bis 3 Monate) nicht für eine Entschlackung geöffnet werden. Durch das ständige Öffnen würde die Schlackenbildung gefördert.

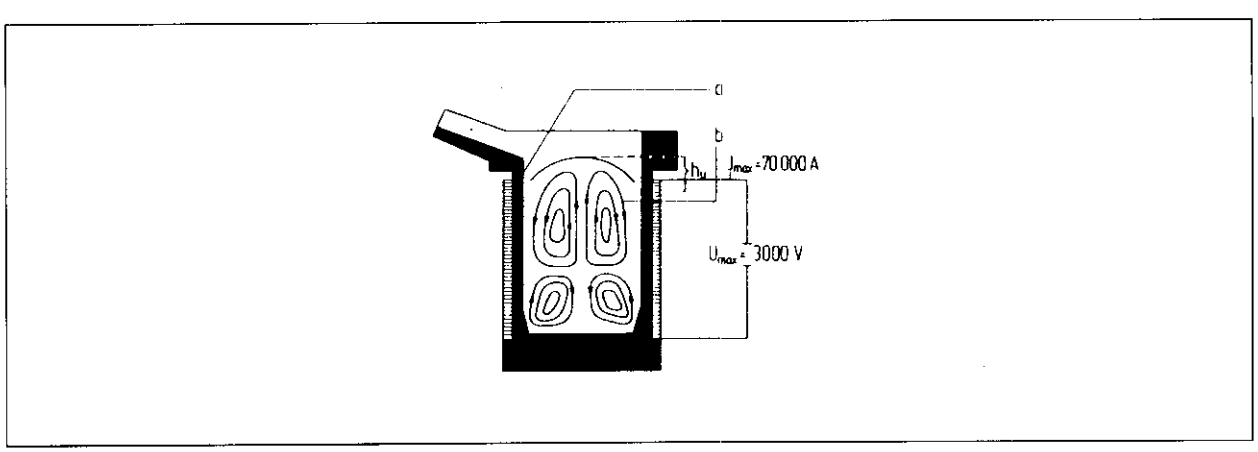
2.2.3 Grundgesetze und Verfahrensprinzipien des Induktionsofens

Elektrotechnische Grundgesetze
Die induktive Energieübertragung geht auf die Maxwell'sche Feldtheorie zurück. Hiernach wird in einer Anzahl von Spulenwindungen, die von einem zeitlich veränderlichen Strom durchflossen werden, eine elektrische Spannung induziert, deren Höhe von der Änderungsgeschwindigkeit des Flusses und damit auch von der Frequenz abhängt.

Das mit einem Transformator vergleichbare Prinzip eines Induktionstiegelofens ist durch die **Schmelze als Sekundärwicklung mit der Windungszahl 1** gekennzeichnet. Ein wichtiges Kriterium hierbei ist die sogenannte Eindringtiefe bzw. der Skin-Effekt, der durch die Stromverdrängung zustande kommt.

Das Zusammenspiel von Induktion und Wärmeleitung bedingt eine Abstimmung von Ofen- bzw. Stückgutdurchmesser und der Eindringtiefe, da bei Unterschreiten eines Grenzwerts die Aufheizzeit merklich zunimmt.

Die Leistungsgrenzen bei heute eingesetzten Anlagen liegen bereits bei 1 000 kW/t. Bei den in Abbildung 2-6 angeführten Leistungsbegrenzungskriterien wird unter anderem auch auf die Bedeutung der Badbewegung hingewiesen, worauf im folgenden Abschnitt eingegangen wird.



a: Tiegelwandstärke, b: Badbewegung, $h_ü$: Badüberhöhung (Quelle: Brokmeier, Neumann)

Abb. 2-6: Technologische Grenzen des Induktionstiegelofens

Badbewegung (Feldverlauf) beim induktiven Schmelzen
Ein wichtiges Phänomen des induktiven Schmelzens ist die Badbewegung, die einen schnellen Stoff- und Temperaturausgleich in der Schmelze ermöglicht. Hierdurch wird auch die Überhitzung der Randzone vermieden, die die gesamte Energie beim Aufheizen aufnimmt.

Die Badüberhöhung h_0 läßt sich über die Frequenz beeinflussen. Mit steigender Frequenz wird sie schwächer und ermöglicht somit eine stärkere Leistungsbeaufschlagung bei vorgegebener Tiegelgröße. In der folgenden Abbildung 2-7 wird die mögliche Ofenleistung in Abhängigkeit vom Ofeninhalt bei unterschiedlich starker Badbewegung dargestellt.

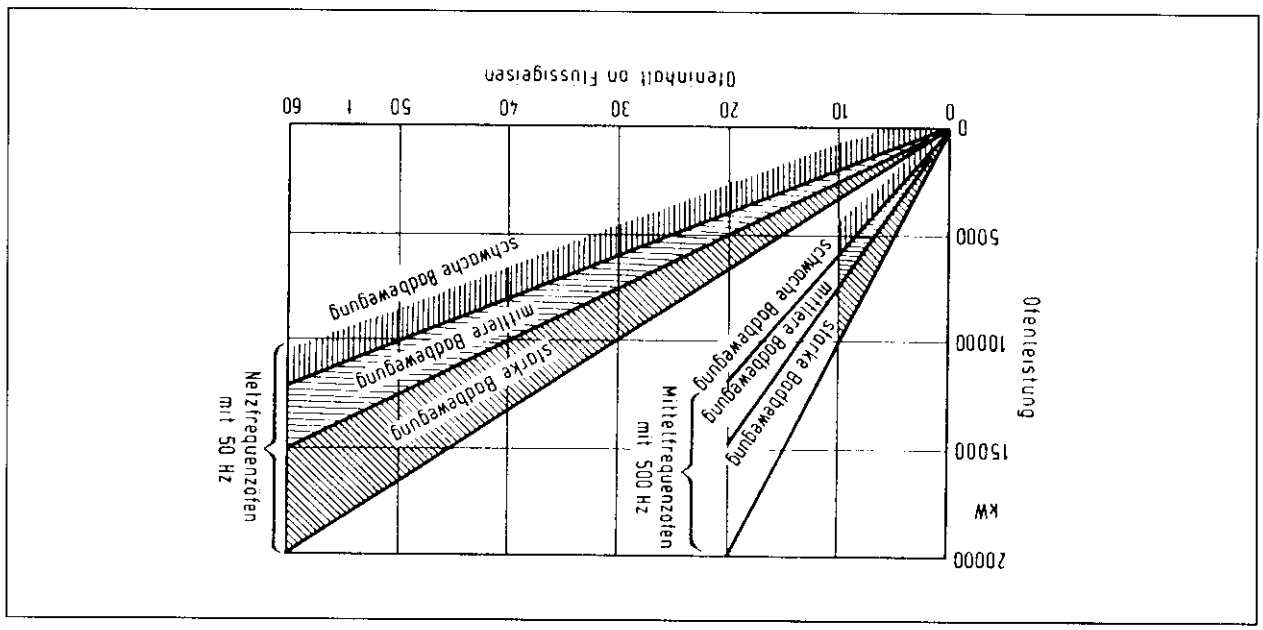


Abb. 2-7: Leistung von Netz- und Mittelfrequenzöfen in Verbindung mit der Badbewegung und dem Tiegelinhalt (Quelle: Neumann)

Die Badbewegung erhöht die Geschwindigkeit der C-Aufnahme. Durch den intensiven Rühreffekt wird ein schnelles Aufkohlen oder Aufsilizieren unter kontrollierten Bedingungen bei gleichzeitig hohem Ausbringen ermöglicht.

Energiebilanz
Für die nachfolgende Energiebilanz wurde die Bereitstellung der elektrischen Energie mit einem Gesamtnutzungsgrad von 36,6 % zugrundegelegt. Das ausgeführte Beispiel für einen 20-t-Ofen beinhaltet auch den Energieanteil einer Schrotttrocknung.

Die für das Schmelzen der Schlacke benötigte Energie ist im allgemeinen sehr gering, da die anfallende Schlackenmenge bei etwa 1–4 % der Eisenschmelze liegt. Der Abbrand an Eisen und Begleitelementen wie Si, Mn und C ist so niedrig, daß die dadurch bedingte Wärmefreisetzung vernachlässigbar ist.

EINSATZENERGIE	
Primärenergie	99,0
Metalloxidation	1,0
	100,0 %
NUTZENERGIEN	
Produkt-Flüssigphase	21,0
VERLUSTENERGIEN	
Energiebereitstellung und -verteilung	60,0
Abbrand	4,0
Tiegelwand	2,5
Spulen	5,5
Zuleitungen	1,0
Antriebe	0,2
Schrotttrocknung	5,5
Sonstige	0,3
	100,0 %

Tab. 2-1: Einsatz-, Nutz- und Verlustenergien für das Schmelzen von Gußeisen im Netzfrequenzinduktionstiegelofen (etwa 10 t/h, 20 t Fassungsvermögen, mit Schrotttrocknung, t_{mittel} = 350 °C)
(Quelle: Decker)

Die auf die Primärenergie bezogene Gesamtnutzung liegt bei 21 %. Es ist bemerkenswert, daß hiermit die gleiche Größenordnung wie beim Schmelzen im Kupolofen erreicht wird, obwohl die Umwandlung in elektrische Energie zwischengeschaltet ist.

2.3 Metallurgie in Induktionsöfen

Der Begriff Metallurgie umschreibt die Maßnahmen, die während der metallurgischen Umwandlungen bzw. Schmelzführung stattfinden.

Die metallurgischen Maßnahmen zur Steuerung der spezifischen Gußqualitäten konzentrieren sich auf:

- Die Art der Einsatzstoffe
- Legieren
- Aufkohlung
- Homogenisierung
- Oxidationsbeeinflussung
- Keimbildung
- Impfbehandlung
- Entfernen bzw. Zulegieren von Elementen wie Kohlenstoff, Schwefel, Mangan, Silizium und Phosphor

Ziel der metallurgischen Schmelzführung ist die wirtschaftliche Erzeugung von gewünschten Gußeigenschaften. Die Gußsorten werden nach Festigkeit und Härte, dem Verschleißverhalten, dem Dämpfungsvermögen und der Wechselfestigkeit eingestuft.

Ein anderes wesentliches Kriterium für die Güte eines Gusses ist auch die Gleichmäßigkeit des Gefüges, was durch kontrollierte Schmelzführung erreicht wird. Die Gußeigenschaften werden bei der Erstarrung in der Form festgelegt.

Die wesentlichen Kenngrößen der metallurgischen Schmelzführung für Gußeisen in Induktionsöfen werden im folgenden näher erörtert.

Einsatzstoffe
Im Induktionsofen kann wahlweise von 100 % Stahlschrott bis zu 100 % Roheisen variiert werden. Ein hoher Roheisenanteil hat meist ein weicheres Eisen zur Folge. Als Einsatzstoff wird neben dem Kreislaufmaterial aus Kostengründen vorwiegend Stahlschrott und relativ wenig Roheisen eingesetzt.

Legieren
Durch das Legieren mit Legierungszuschlägen werden bei Gußeisen ganz bestimmte Eigenschaften, wie z. B. Härte und Verschleißfestigkeit erzielt.

Das Legieren oder das Hinzufügen von Elementen zur Schmelze läßt sich in Induktionsöfen relativ treffsicher im Vergleich zu anderen Schmelzaggregaten durchführen.

Aufkohlung
Beim Chargieren von Stahlschrott wird der fehlende Kohlenstoff über Aufkohlungsmittel eingebracht, wozu man vielfach Elektrodengraphit verwendet, da er besonders wenig Asche erzeugt und einen niedrigen Schwefelgehalt aufweist. Weiterhin von Bedeutung ist die Reinheit der Aufkohlungsmittel. Die Ausbringung ist hierbei besonders günstig und liegt meist über 90 %.

Die Auflösungsvorgänge werden durch die induktive Badbewegung erheblich verkürzt, da nicht die Diffusion, sondern der eigentliche Kohlenstoffübergang zum zeitbestimmenden Faktor wird. Das Oberflächen-/Volumenverhältnis (Körnung) und die Benetzbarkeit werden somit wichtige Kriterien für den Aufkohlungsvorgang sowie für den Abbrand. Verbrannte und nicht aufgelöste Aufkohlungsmittel und sonstiger Abbrand gehen in die Schlacke ein oder werden als Staub gefaßt.

Homogenisieren
Es gelangen zahlreiche Verunreinigungen über das Einsatzmaterial in den Ofen, die aus der Schmelze durch Nachbehandlung entfernt werden müssen.

Die Art der Verunreinigungen reicht von den Oxiden über Sulfide bis zu Carbiden, die durch Überhitzung auf drei Wegen entfernt werden können:

1. Ausscheiden durch homogenisierendes Überhitzen im Temperaturbereich oberhalb 1 450 °C bis 1 500 °C in Verbindung mit intensiver (induktiver) **Badbewegung.**

2. Durch Überhitzen oberhalb der C/Si-Gleichgewichtstemperatur kann der Kochvorgang, d. h. eine Oxidation von Kohlenstoff zu CO, eingeleitet werden, so daß eine Durchgasung die Folge ist. Der Reinigungseffekt einer solchen **Durchgasung** ist sehr intensiv und wirkt bereits nach kurzer Zeit.

3. Beim Überhitzen auf 1 500 bis 1 550 °C wird die C/Si-Gleichgewichtstemperatur überschritten und die desoxidierende Wirkung des Kohlenstoffs gegenüber den Oxiden FeO, MnO und SiO_2 kommt voll zur Geltung. Suspensionen dieser Oxide werden durch Reduktion abgebaut und somit unschädlich gemacht. Es handelt sich hierbei also um eine **chemische Reinigung.**

Durch Homogenisierung wird bei meist gleichzeitig steigender Härte eine Verbesserung der Festigkeit erreicht. Werden zu viele Überhitzungszyklen oder zu lange Überhitzungsphasen gefahren, erhöhen sich die Schlacken- und Staubmengen.

Oxidationsverhalten und Abbrand/Zubrand
Mit dem Oxidationsverhalten direkt verknüpft ist der Abbrand des Eisens und seiner Begleitelemente. Der Gesamtabbrand im Induktionsofen ist relativ gering; er liegt insgesamt betrachtet meist unter 2 bis 3 %. Bei starker Badbewegung ist auch der Abbrand höher als bei ruhig stehendem Bad. Er steigt auch bei höheren Temperaturen merklich an. Durch optimierte Fahrweise können der Abbrand und die Oxidation und demzufolge die Schlacken- und Staubmenge verringert werden.

Keimbildungsgeschehen
Die Keimbildung bei der Erstarrung des Gußeisens ist durch die vielfältig möglichen Gefügeausbildungen beim Erstarren der Gußeisenschmelze bedingt. Zum Erzielen eines guten Erstarrungsgefüges bedarf es einer Keimhilfe für den Graphit, um ein feinkörniges Gefüge zu erhalten, das hohe Festigkeitswerte bei gleichzeitig geringer Härte ergibt. Die Kenntnis dieser Zusammenhänge ist notwendig, um die für die Keimbildung optimalen Bedingungen einzustellen. Dies zeigt auch der sogenannte **Totbrateffekt,** der durch einen weitgehenden Sauerstoffabbau zustande kommt.

Impfbehandlung
Impfen geschieht durch Zugabe eines sog. Impfmittels (Ferrosilizium, Kalziumsilizium, Aluminium) zur Gußeisenschmelze kurz vor dem Vergießen, zur Förderung der Grauerstarrung und Vermeidung der Kantenhärte. Es entstehen dadurch viele Keimbildungszentren für die Graphitausscheidung zur Ausbildung von Graphitkugeln und Graphitlamellen.

Bei der **Pfannenimpfung** wird der Impfstoff beim Umfüllen des flüssigen Eisens vom Induktionsofen in die Pfanne zugesetzt mit dem Problem des frühzeitigen Abklingeffekts der Wirkung des Impfmittels.

Um dem Abklingeffekt zu begegnen, wurde die **Formimpfung** entwickelt. Meist wird das Impfmittel dabei in das Einlaufsystem eingelegt, so daß beim Durchlaufen des flüssigen Eisens eine Auflösung des Impfmittels eintritt.

Um Schwierigkeiten in bezug auf eine gleichmäßige Auflösung und Verteilung zu vermeiden, kann das Impfmittel in den einlaufenden Gießstrahl eingebracht werden. Bei der sogenannten **Gießstrahlimpfung** geschieht dies, indem man körniges Material kontinuierlich zugibt.

Beim **CQ-Verfahren** dagegen (control quality) wird das Impfmittel mit einem Draht umhüllt, der kontinuierlich mit dem einlaufenden Eisen zugeführt wird. Die Auflösung des Drahtes erfolgt unterhalb der Oberfläche, so daß man sehr feinkörniges Impfmaterial verwenden kann und auch Verluste durch die Thermik sowie durch Oxidation vermieden werden. Hierdurch erreicht man eine hohe Treffsicherheit und eine besonders gute Nutzung des Impfmittels. Der Verbrauch des Impfmittels liegt im Vergleich zur Pfannenimpfung bei nur 10 %, so daß hierbei Impfmittelmengen von 0,02 bis 0,04 % für Grauguß und 0,04 bis 0,06 % bei Sphäroguß benötigt werden.

2.4 Ofenbetrieb und Betriebsweise

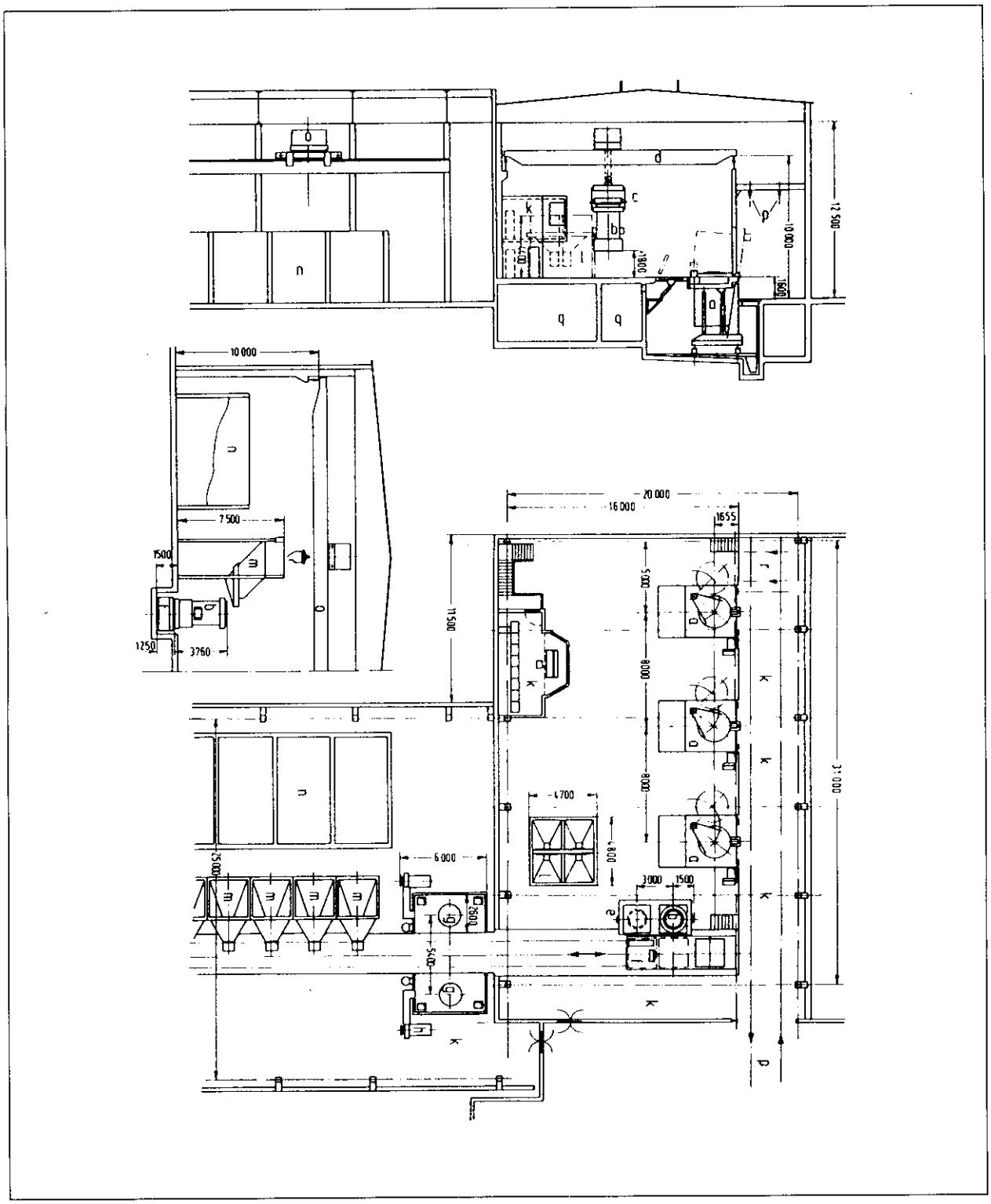
Im Gegensatz zum Kupolofen ist der Induktionsofen sehr flexibel in bezug auf die Anpassung des Schmelzbetriebes an den Gießbetrieb. Die Menge und die zeitliche Folge der Eisenentnahme können wahlweise variieren. Der Schmelzvorgang bzw. der Chargierrhythmus wird auf den Produktionsfluß und auf die gewünschte Temperaturführung abgestimmt. Der Induktionstiegelofen erlaubt einen quasi kontinuierlichen Betrieb.

Eine Induktionsofen-Schmelzanlage besteht aus den in der Tabelle 2-2 angegebenen Anlagenkomponenten:

- Rohstofflager mit Kranbahn
- Vorgeschaltete Trocknungsanlage für feuchtes Einsatzmaterial bei Netzfrequenzbetrieb; Trocknungsanlage ist ggf. nicht erforderlich, wenn die Einsatzstoffe trocken in Hallen gelagert werden
- Gattierungsplatz mit Tagesbunker und Kranbahn für die metallischen Komponenten Kreislauf, Stahlschrott, Roheisen und Legierungszuschläge wie Aufkohlungsmittel (meist Elektrographit) FeSi, Ferromangan und evtl. weitere Komponenten wie Mo oder Cr
- Wägeeinrichtung für die metallischen Einsatzstoffe und die Legierungszuschläge
- Beschickungskübel (bei Trocknung evtl. Spezialausführung)
- **Induktionstiegelofen** mit der erforderlichen elektrischen Einrichtung
- Wasserkreislauf mit den Teilkreisläufen für die Ofenspule, für Kondensatoren und für Umrichter die Mittelfrequenzanlagen
- Entschlackung
- Ofenhaube für Absaugung bei geöffnetem Ofen oder auch eine Tiegelrandabsaugung, die den Auswurf sowohl bei geschlossenem Deckel als auch bei geöffnetem Deckel erfaßt
- Entstaubungsanlage, bestehend aus Zyklonabscheider oder Gewebefilter

Tab. 2-2: Komponenten einer Induktionsofen-Schmelzanlage

Die folgende Abbildung gibt einen beispielhaften Überblick einer Gießerei mit Induktionsöfen wieder.



a: Induktionsöfen, b: Beschickungs- und Vorwärmkübel, c: Kübelgehänge mit Deckel, d: Brückenkran, e: Abstell-Rollgang, f: Chargierwagen mit Waage, g: Schrottvorwärmeanlage, h: Brennluftgebläse, i: Abgaskamine, k: Steuerstand, l: 4teiliger Zuschlagbunker, m: Gattierungsbunker mit Beschickungsrinne, n: Vorratsbunker, o: Magnetkran, p: Einschienen-Hängebahn für Flüssiggut, q: Schalträume für Öfen, r: Querfahrplatz für Einschienenbahn (Quelle: IT 9)

Abb. 2-8: Beispiel einer Gießerei mit Induktionsöfen

Gattierung
Das Gattieren bezeichnet das Zusammenstellen der zu schmelzenden Chargen einschließlich der erforderlichen Zuschläge für die Ofenbeschickung. Die Gattierungsanlage umfaßt den Gattierplatz, Vorratslager sowie Förder- und Verwiegeeinrichtungen. Über die Gattierungsberechnung werden, ausgehend von den Anteilen der zu erschmelzenden Gußart, die Einsatzstoffmengen ermittelt.

Die Charge zum Schmelzen von normalen Graugußqualitäten GG 15 bis GG 30 setzt sich beispielsweise wie folgt zusammen:

30 bis 40 % Kreislauf
50 bis 70 % Stahlschrott
0 bis 20 % Roheisen
0 bis 30 % Gußbruch

Beim Einsetzen von Stahlschrott ist zu beachten, daß legierter Schrott oder auch NE-Metallteile nicht eingeschleppt werden. Etwa 75 % der gesamten Rohstahlerzeugung umfaßt die Sorten St 37, St 42 und St 50, so daß der Hauptschrottanfall aus unlegiertem Stahl besteht.

Eisenbahnschienen liegen im C-Gehalt (etwa 0,7 %) und auch im Mangangehalt (0,8 bis 1,0 %) etwas höher und sind wegen ihrer Reinheit ein begehrter Schrott.

Für die Herstellung von Sphäroguß lassen sich folgende Einsatzstoffe angeben:

50 bis 55 % Kreislauf
0 bis 50 % Stahlschrott mit Mn $\leq$ 0,6 % für perlitischen bzw. perlitisch-ferritischen Guß
0 bis 20 % Roheisen mit Mn $\leq$ 0,6 % für perlitisch-ferritischen Guß
20 bis 50 % Roheisen für ferritischen Guß mit ca. 0,1 % Mn
0 bis 20 % Stahlschrott für ferritischen Guß mit ca. 0,3 % Mn

Schrottvorwärmung
Bei allen Einsatzstoffen im Induktionsofen ist darauf zu achten, daß kein feuchtes Material in das flüssige Bad eingetaucht wird, denn hierbei kann es zu explosionsartigem Auswurf kommen. In kritischen Fällen muß aufgrund der Betriebssicherheit eine Trocknung des Einsatzmaterials vorgeschaltet werden.

Das Aufheizen hierfür erfolgt im allgemeinen mit Öl, Erdgas oder auch mit elektrischer Energie.

Für die Vorwärmung bzw. Trocknung unterscheidet man die stationären Verfahren von den Durchlauf- bzw. Durchstoßanlagen, die entweder für Kübel- oder Bandtransport vorgesehen sind.

Entstaubung
Für die Grobentstaubung setzt man Zyklone zur Vorabscheidung mit anschließendem Gewebefilter ein. Letztere sind weniger aufwendig als eine Naßentstaubung. Sie bietet sich beim Induktions-Tiegelofen an, da das abgesaugte Gas keine hohen Temperaturen aufweist (meist bis 100 °C). Eine eingebaute Temperaturregelung schützt gegen unerwartet auftretende Überhitzungen durch automatisch beigemischte Frischluft. Zur Absaugung werden Deckelringabsaugungen eingesetzt, die nur bei geschlossenem Ofen wirksam sind, während die Tiegelrandabsaugung eine weitergehende Erfassung erlaubt. Der Staubauswurf bei geöffnetem Ofen läßt sich am besten durch eine schwenkbar angebrachte Haube erfassen.

Warmhalten, Speichern
Ein rationeller, optimierter Betriebsablauf als Ergebnis einer abgestimmten Logistik ist insbesondere für das Ineinandergreifen von Form- und Schmelzbetrieb wichtig. Das Verbindungsglied ist üblicherweise der Induktionsrinnenofen als Warmhalte- und Speicherofen bis zur Übergabe an die Formanlage.

Duplexbetrieb
Der Induktionsofen eignet sich gut zum Duplizieren, da er sowohl hinsichtlich der zeitlichen Eisenentnahme als auch der legierungstechnischen Möglichkeiten wegen seiner hohen Flexibilität und schnellen Eingriffsmöglichkeiten den jeweiligen Betriebsbelangen angepaßt werden kann.

Sind Kupolofen und Induktionsofen nebeneinander in Betrieb, wird von der Möglichkeit des Duplizierens Gebrauch gemacht, wenn Engpässe in der Durchsatzmenge oder Analysenanpassung auftreten.

Abschlacken
Vor dem Abgießen des flüssigen Gußeisens wird die Schlackendecke entweder manuell abgeschöpft oder beim Kippen der Öfen in die Schlackebehälter abgegossen.

2.5 Ofenzustellung

Von besonderer Bedeutung für die Standzeit der Ofenfutter und somit der Ausbruchmengen ist die **Zustellung** des Induktionsofens. Unter Zustellung versteht man in der Gießerei die feuerfeste Auskleidung von Schmelz- und Gießeinrichtungen.

Die Zustellungen werden entweder basisch oder sauer ausgeführt. Basische Zustellungen sind Stampfmassen, Stein oder Schlacken, die aus vorwiegend basischen Metalloxiden wie Magnesit, Chrommagnesit, Chromit, Dolomit oder Kalkstein (in Schlacken) bestehen. Die saure Zustellung besteht vorwiegend aus sauren Oxiden wie Quarzit (SiO_2).

Außer den basischen und sauren Stoffen unterscheidet man noch eine dritte Gruppe, bei der Al_2O_3 der Hauptbestandteil ist und die als neutral bezeichnet wird. Doch wird sie besser als Gruppe der tonerdehaltigen Stoffe geführt. Die folgende Art der üblichen Einteilung stützt sich nicht streng auf das chemische Verhalten:

Gruppe	Wesentliche Stoffarten
Basisch	Magnesiumoxid Kalziumoxid Chromoxid Dolomit Kalkstein
Sauer	Siliziumoxid Zirkoniumoxid
Neutral (tonerdig)	Aluminiumoxid Titanoxid

Tab. 2-3: Einteilung der feuerfesten Baustoffe (Zustellungen)

Durch sorgfältiges Stampfen und Rütteln entsteht eine dichte Zustellung (Ofenfutter) ohne Lockerstellen oder Hohlräume. Folgende Zustellstoffe kommen zum Einsatz:

Feuerfeste Stoffe (Feuerfeststoffe) sind bei hohen Temperaturen beständige mineralische bzw. keramische Stoffe. Die Stoffe dienen zur Herstellung von Tiegeln, Steinen, Massen für die Ausmauerung bzw. Auskleidung von Schmelzöfen, Warmhalteöfen, Wärmebehandlungsöfen oder Gieß- und Beschickungseinrichtungen, Pfannen und Transportmitteln für flüssige

Metalle. Die Tabelle 2-4 vermittelt eine Übersicht über die Verwendungsmöglichkeiten feuerfester Baustoffe für Induktionstiegelöfen zum Schmelzen von Gußeisen und Stahl.

Feuerfeste Stoffe zur Auskleidung von Schmelzöfen
Vorgefertigte Tiegel Gebrannte saure Tiegel für Gußeisen Ton-Graphit-Tiegel für spezielle Legierungen Korundtiegel für Edelstähle (Feinguß)
Stampfung mit plastischen Massen Klebsandmassen für Gußeisen $<1\,450$ °C Phosphatgebundene Quarzitmassen für Gußeisen und Stahl Korundmassen für Stahl Zirkonmassen für Stahl
Stampfung mit trockenen Massen Quarzit mit Borsäure für Gußeisen und Stahl Korundmassen für Gußeisen und Leichtmetall Korund-Spinell-Massen für Stahl Magnesitmassen für Stahl
Kombinierte Zustellungsverfahren Korundsteine und Korundmassen für Gußeisen Magnesitsteine und -massen für Stahl Trockene und plastische Quarzitmassen für Guß-Compound-Verfahren

Tab. 2-4: Feuerfeste Stoffe zur Auskleidung von Induktionsöfen

Massen sind feuerfeste Stoffe, die erst bei ihrer Verwendung, z. B. Auskleidung eines Ofens, eingeformt und beim Aufheizen dieses Ofens gebrannt werden. Man unterscheidet je nach Verarbeitung **Stampfmassen,** die unter Druck verdichtet werden, **plastische Massen,** die nur einer geringen Verdichtung bedürfen, **Gießmassen,** die lediglich in eine Verschalung gefüllt werden, **Spritzmassen,** die auf ein feuerfestes Mauerwerk aufgespritzt werden, ferner **Anstrichmassen** für meist kalthärtende Überzüge sowie schließlich **feuerfesten Mörtel** zum Vermauern von Steinen. All diese Massen werden im feuchten Zustand verarbeitet. Je nach Art des Bindemechanismus unterscheidet man auch solche Massen, die durch **keramische Sinterung** härten, **hydraulisch** durch Zementbindung oder **chemisch** durch entsprechende Zusätze (Wasserglas, Aluminiumphosphat, Magnesiumphosphat u. a.) abbinden. Ferner Massen, die sich durch beigemischten **Ton** schon bei niedriger Temperatur verfestigen sowie jene mit **Teerbindung** (Kohlenstoffstampfmassen).

Feuerfester Beton (Feuerbeton) ist eine feuerfeste Gieß-, Stampf- oder Spritzmasse, bestehend aus körnigen Feuerfeststoffen und Zement. Feuerfester Beton wird zur Auskleidung von Schmelz- und Wärmebehandlungsöfen, Gießpfannen, Gieß- und Schlackenrinnen, Abgußschnauzen, Hauben, Ofendeckeln und Chargieröffnungen, desgleichen zur Ausstampfung von Schlagpanzern anstelle von Eisenbewehrungen verwendet. Für hohe thermische Beanspruchung reicht die Feuerbeständigkeit des Betons jedoch nicht aus, besonders wenn noch Schlackenangriffe oder metallurgische Reaktionen hinzukommen. Elektroöfen lassen sich daher nur im Bereich außerhalb der Schmelzzone mit Feuerbeton auskleiden.

Einfluß der Zustellungsmaterialien auf die Schlackenentstehung

Die Entstehung der Schlacken und ihre Mengen hängen sehr eng auch mit der Wahl des Ofenfutterbaustoffs ab. Insbesondere FeO, MnO und CaO greifen das saure Futter stark an, wobei niedrig schmelzende, dünnflüssige Schlacken entstehen, die man zweckmäßigerweise

vor dem Entschlacken mit Zusatzstoffen abdeckt, um eine viskose zusammenhängende Schlacke zu erhalten.

Bei diesen ungesättigten Schlacken besteht die Gefahr eines verstärkten Futterangriffs, weil sie mit dem sauren SiO_2-Futteranteil reagieren, wodurch sich die Schlackenmenge vergrößert.

Für das **Ofenfutter** bzw. Zustellung wird aus elektrotechnischen Gründen eine möglichst geringe Wandstärke gefordert. Demzufolge ist die Rißbeständigkeit besonders wichtig. Hinzu kommt die Gefahr, daß im Falle des Eindringens von flüssigem Eisen in einen solchen horizontalen Riß das Eisen nicht sogleich erstarrt, sondern unter Umständen infolge der Durchdringung von Magnetfeldlinien weiter aufgeheizt, flüssig gehalten und sogar überhitzt wird und bis zur Ofenspule vordringt. Ein in bezug auf sein Ausdehnungsverhalten und der Rißanfälligkeit sehr günstiger Ofenbaustoff ist SiO_2, insbesondere für den Grauguß. Oberhalb 860 °C tritt im Gegensatz zu basischen Materialien kaum noch eine Ausdehnung des Futters ein, so daß man bei längeren Wartezeiten den Ofen entleeren und mit Brennern bei 900 bis 1 000 °C warmhalten kann. Die Temperaturbeständigkeit ist für den Dauerbetrieb auf 1 550 °C bis max. 1 580 °C begrenzt. Durch die Wahl des geeigneten Ofenfuttermaterials kann der Anfall von Ofenausbruch verringert werden.

3 Abfallarten – Entstehung, Aufkommen und Entsorgungsweg

In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten Abfallarten, die in Induktionsofenschmelzanlagen bei der Erzeugung von Gußeisen anfallen, nach Entstehung, Inhaltsstoffen und vorgeschriebener Entsorgung charakterisiert.

3.1 Induktionsofenschlacke

Beim Erschmelzen von Gußeisen werden Eisenträger, Zuschlagstoffe, Schlackebildner, Schmelzhilfsmittel und etwaige anhaftende Störstoffe in den Ofen chargiert und verflüssigt. Die Schlacken (Elektroofenschlacke, Abfallschlüssel 31218) entstehen bei der Verflüssigung des Einsatzes. Sie bilden sich aus Ofenfutterabbrand, Sandanhang, Verunreinigungen und Schlackenmittel. Die Schlacken setzen sich üblicherweise aus Siliziumoxid (SiO_2), Aluminiumoxid (Al_2O_3), Kalziumoxid (CaO), Eisenoxid (FeO) und Manganoxid (MnO) zusammen. Ebenso werden Spuren von Blei, Kupfer, Nickel, Chrom und Zink in die flüssige Schlacke eingelagert.

Die Zusammensetzung der Schlacke kann je nach Schmelztechnik und der zu erzeugenden Gußeisensorte sehr stark schwanken. In Tabelle 3-1 sind Angaben zu unlegierten bzw. niedriglegierten Gußeisensorten enthalten.

Komponenten als Oxide		Durchschnittswerte %
Silizium	SiO_2	bis 90
Eisen*	FeO	<10
Mangan	MnO	<10
Kalzium	CaO	max. 1
Magnesium	MgO	0–3
Aluminium	Al_2O_3	max. 1
Nickel	NiO	0–1
Chrom	Cr_2O_3	max. 2
Blei	PbO	Spuren
Kupfer	CuO	Spuren
Phosphor	P_2O_5	<1
Titan	TiO	<1
Zink	ZnO	Spuren

* Eisen gesamt, metallisch und oxidisch

Tab. 3-1: Zusammensetzung von Induktionsofenschlacken beim Schmelzen von unlegiertem und niedriglegiertem Gußeisen (GGL; GGG)

Die Schlackendichten liegen zwischen 2 und 3 t/m^3.

Die flüssige Schlacke bildet eine Schlackendecke auf dem Metallbad. Sie schützt so die Schmelze vor Oxidation aus der Luft oder aus der Ofenatmosphäre. Sie kann aber auch zusätzliche Bestandteile enthalten, die mit dem flüssigen Metall in beabsichtigter Weise reagieren.

Schlacken sind fast ausschließlich oxidische Stoffe, die sich normalerweise nicht in flüssigen Metallen lösen, sondern sich von diesen leicht trennen und wegen ihrer geringeren Dichte auf

dem flüssigen Metall eine separate Schicht bilden. Die Schlacken entstehen durch Aufschmelzen nichtmetallischer, oxidischer Bestandteile, die im Metalleinsatz vorhanden waren oder durch Oxidation während des Metallschmelzens. Außerdem können Schlacken absichtlich erzeugt werden durch den Zusatz oxidischer Zuschlagstoffe zum Metalleinsatz oder zum bereits flüssigen Metall. Voraussetzung zur Verwertung ist, daß die Schlacke ihrerseits schmilzt und getrennt vom Flüssigeisen dem Ofen entnommen wird.

Man unterscheidet je nach Reaktionsverhalten basische und saure Schlacken. Basische Schlacken bestehen aus einem Überschuß an basischen Oxiden (CaO, MgO, MnO und FeO). Die Basizität ist dann $>1{,}0$. Saure Schlacken bestehen überwiegend aus sauren Oxiden (SiO_2, P_2O_5) und besitzen eine Basizität $<1{,}0$. Metallurgisch betrachtet streben Schlacken eine Neutralisation in Richtung einer Basizität von 1,0 an. Saure Schlacken reagieren daher mit basischen Oxiden und umgekehrt basische Schlacken mit sauren Oxiden. Basizität bezeichnet das Verhältnis der basischen Oxide zu den sauren Oxiden. Bei der Erzeugung von Gußeisen (GGL und GGG) in Induktionsöfen wird gezielt eine saure Schlacke zur Vermeidung erhöhten Futterverschleißes eingestellt.

Die jährlich zu entsorgende gesamte Schlackenmenge aus allen baden-württembergischen Gießereien beträgt ca. 40 000 t. Der spezifische Schlackenanfall liegt im allgemeinen zwischen 20 und 40 kg Schlacke/t Flüssigeisen. Unter der Annahme, daß weniger als die Hälfte der erzeugten Gußmengen in Induktionsöfen erschmolzen werden, kann von einer Schlackenmenge um etwa 10 000 t aus Induktionsofenanlagen ausgegangen werden.

Die flüssigen Schlacken werden entweder in Schlackenwannen geleitet oder in kleineren Induktionsöfen von Hand abgeschlackt. Nach Abkühlung entstehen Schlacken mit einem außerordentlich breiten Korngrößenspektrum (staubartig bis großstückig). In der Regel können diese auf Hausmülldeponien entsorgt werden, die Deponiekosten richten sich nach den Festlegungen in den Abfallsatzungen der entsorgungspflichtigen Gebietskörperschaften.

3.2 Rinnenofenschlacken

Beim Duplexbetrieb wird das flüssige Gußeisen in die Rinnenöfen geleitet, wo es gespeichert und warmgehalten wird. Es entsteht eine geringe Menge an Rinnenofenschlacken (Elektroofenschlacke, Abfallschlüssel 31218). Diese werden diskontinuierlich ausgeschleust und in Wannen geleitet, wo sie erstarren. Dabei entstehen nach Abkühlung ungleichmäßig große Schlackenstücke. Die spezifische Menge liegt bei etwa 1,5 bis 5,0 kg Schlacke/t Flüssigeisen. Die landesweit anfallenden Mengen sind vergleichsweise gering und nicht genau zu beziffern.

Die Rinnenofenschlacken enthalten meist mehr metallische Bestandteile als die Schlacken aus den Induktionstiegelöfen. Analysen über Rinnenofenschlacken liegen in den meisten Fällen nicht vor. Oft existieren aber schon Eluatanalysen, die Aussagen zur Art der Ablagerung erlauben. Rinnenöfen für Gußeisenwerkstoffe werden in der Regel mit feuerfesten Baustoffen auf Al_2O_3-Basis (Korund) ausgerüstet. Die Schlacken aus diesen Öfen sind neutral. Sie sind z. T. stark mit Eisenbeimengungen versehen.

Diese Schlacken werden in der Regel gemeinsam mit den Induktionstiegelofenschlacken auf Hausmülldeponien entsorgt.

3.3 Stäube

Über den Gattierungsstellen und den Induktionsöfen wird die staubhaltige Abluft abgesaugt und üblicherweise zentralen Filteranlagen zugeführt.

Diese Staubgemische (eisenhaltiger Staub ohne schädliche Beimengungen, Abfallschlüssel 35101) bestehen aus Metalloxiden und Verunreinigungen. Die spezifischen Mengen liegen im allgemeinen unter 1 kg/t Schmelzgut. In einzelnen Fällen können bis zu 10 kg/t Schmelzgut entstehen.

Diese Stäube werden oft befeuchtet und von den entsorgungspflichtigen Körperschaften in den meisten Fällen auf Hausmülldeponien entsorgt.

Vollanalysen der Stäube existieren in den wenigsten Fällen. Die Betreiber können die Staubzusammensetzungen nur hinsichtlich der wesentlichen Bestandteile abschätzen.

Nachfolgend sind beispielhaft Zusammensetzungen des Staubes aus einem Induktionstiegelofen und einer Hallenentstaubungsanlage dargestellt.

Stoffart	**in Prozent**
Kohlenstoff	5–8
Eisenoxide	bis 40
Magnesiumoxide	bis 15
Siliziumoxide	bis 25
Manganoxide	bis 5
Andere	bis 15

Tab. 3-2: Zusammensetzung von Stäuben aus Induktionstiegelöfen beim Schmelzen von Kugelgraphitguß

Stoffart	**in Prozent**
Eisenoxide	85
Siliziumoxide	10
Sonstige Verschmutzungen	5

Tab. 3-3: Geschätzte Staubzusammensetzung aus der Hallenentstaubung einer Induktionsofenschmelzanlage

3.4 Tiegel- und Vergießofenausbrüche

In regelmäßigen Zeitabständen müssen die Tiegel oder Ausmauerungen der Schmelzöfen ausgebrochen und neu ausgemauert werden. Sie sind abgenutzt und ausgebrannt, wodurch eine Durchbruchgefahr des Tiegels entsteht. Die Ofenausbrüche fallen in unregelmäßig großen Bruchstücken bis zur Staubgröße an.

Je nach Schmelzgut und Ofenfahrweise müssen Tiegelöfen, deren Ausmauerungsmaterial aus Siliziumoxid (saure Zustellung) besteht und die starken Temperaturschwankungen ausgesetzt sind, jede Woche oder unter weniger verschleißenden Umständen alle 2–3 Monate erneuert werden.

Die weniger extremen Temperaturschwankungen ausgesetzten Ausmauerungen für die Rinnenöfen bestehen vor allem aus Aluminium-, Titan- und Eisenoxid sowie aus Beimengungen von Zement, Gießmasse, Bindemitteln und Härter. Die Rinnenofenausmauerungen haben Standzeiten zwischen 3 Monaten und 3 Jahren.

Beim Schmelzen von Gußeisen betragen die Ausbruchmengen je nach Ofengröße und Betriebsweise um 1 bis 3 kg/t Flüssigeisen, welche allerdings beim Schmelzen von Sphäroguß auf 2 bis

5 kg/t ansteigen können. Dies ist durch die höhere Temperatur und den über den Kreislauf eingeschleppten Magnesium- bzw. MgO-Anteil bedingt, der das saure Futter stärker angreift.

Nachfolgende Tabellen zeigen beispielhaft Zusammensetzungen von Ofenausbrüchen, wie sie in Tiegel- und Rinnenöfen anfallen können, wobei die Schwermetallanteile vom Einsatz abhängig sind. Die Ofenausbruchdichten liegen zwischen 1 bis 1,5 t/m^3.

Komponenten als Oxide		**Durchschnittswerte %**
Silizium	SiO_2	50–70
Eisen	FeO	5–10
Mangan	MnO	1–5
Kalzium	CaO	0–5
Magnesium	MgO	0–3
Aluminium	Al_2O_3	0–5
Chrom*	Cr_2O_3	0–10
Nickel	NiO	unter 1
Blei	PbO	unter 1
Kupfer	CuO	unter 1
Phosphor	P_2O_5	unter 1
Titan	TiO	unter 1
Zink	ZnO	unter 1
Eisen metallisch	Fe	0–10

* Eintrag über hochlegierte Gußschmelzen

Tab. 3-4: Zusammensetzungen von Netzfrequenztiegelofenausbrüchen

Komponenten als Oxide		**Durchschnittswerte %**
Aluminium	Al_2O_3	50–75
Silizium	SiO_2	5–15
Eisen	FeO	0–3
Kalzium	CaO	0–5
Chrom*	Cr_2O_3	0–10

* Eintrag über hochlegierte Gußschmelzen

Tab. 3-5: Zusammensetzungen von Induktionsrinnenofenausbrüchen

Sofern sie keine schädlichen Verunreinigungen enthalten, sind Ofenausbrüche aus metallurgischen Prozessen (Abfallschlüssel 31103) keine besonders überwachungsbedürftigen Abfälle. Der überwiegende Teil aller Ofenausbrüche (etwa 70–80 %) aus metallurgischen Prozessen entspricht diesem Abfallschlüssel. Dies gilt insbesondere für die sauren und neutralen Ofanausbrüche. Sie unterliegen keiner besonderen Überwachung und werden auf Hausmülldeponien entsorgt.

In einigen Anwendungsfällen kann durch Reaktion der Schmelze mit den Ofentiegeln ein Ofenausbruch entstehen, der schädliche Verunreinigungen enthält.

Nach der Abfallbestimmungsverordnung (AbfBestV) sind Ofenausbrüche aus metallurgischen Prozessen mit schädlichen Verunreinigungen (Abfallschlüssel 31108) besonders überwachungsbedürftige Abfälle und sind nach der TA Abfall auf Sonderabfalldeponien zu entsorgen, sofern sie nicht stofflich verwertet werden können. Die Entsorgungskosten betragen derzeit 400–500 DM/t. Hinzu kommt die Abfallabgabe nach dem Landesabfallabgabengesetz (LAbfAbG). Im Anhang des Landesabfallabgabengesetzes (LAbfAbG) werden Ofenausbrüche der Kategorie 2 zugeordnet, damit beträgt die Abgabe seit 1993 200 DM/t.

4 Vermeidung und Verwertung von Abfällen aus Induktionsofenschmelzanlagen für Gußeisen

In Abschnitt 4.1 werden zuerst die **Vermeidungsmaßnahmen** für Schlacken, Stäube und Ofenausbrüche gemeinsam dargestellt. Durch die erläuterten Maßnahmen werden alle Reststoffe gleichzeitig, jedoch in unterschiedlichem Maß reduziert.

Zur Verwertung müssen die Reststoffe im allgemeinen vorher aufbereitet werden. Deshalb sind in Abschnitt 4.2 spezielle **Aufbereitungs- bzw. Behandlungstechnologien** beschrieben, durch die eine Verwertung der Reststoffe erst möglich wird.

In Abschnitt 4.3 folgt die Darstellung der **Verwertungs-** bzw. **Einsatzmöglichkeiten** für die einzelnen Reststoffe.

Einen Überblick über die möglichen Vermeidungs-, Behandlungs- und Verwertungsmaßnahmen gibt die folgende Tabelle 4-1.

Abfall-/Reststoffart und Verwertungspotential in Prozent	Generelle Vermeidung (für alle Abfälle/Reststoffe)	Behandlungsmaßnahmen	Stoffliche Verwertung/Einsatzgebiete
Schlacken aus Induktionsöfen (60–90)	Vermeidungsmaßnahmen sind: – saubere Einsatzstoffe – Oxidierende Stoffe abdecken – Reduzierende Ofenatmosphäre – Geschlossene Ofenfahrweise	– Zerkleinerung – Getrennthaltung	– Straßenbau* (z. B. Unterbaumaterial) – Beimengung zu natürlichen Mineralstoffen* – Bauindustrie* (z. B. Fertigbauteile)
Schlacken aus Rinnenöfen (60–90)	– Unnötige Überhitzung vermeiden – Unnötige Wartezeiten bis zum Vergießen vermeiden – angepaßtes Handling (z. B. Einsatz von Schlackenbindemitteln)	– Zerkleinerung – Getrennthaltung	– Einsatz wie Induktionsofenschlacke – Wiedereinsatz in Hochöfen zur Nutzung der Eisenanteile
Ofen- und Tiegel-Ausbrüche (0–50)	– Netzfrequenzöfen durch Mittelfrequenzöfen ersetzen, dadurch flexible Fahrweise, bei geeigneter Arbeitsweise – angepaßte Ausmauerungen und Tiegel	– Zerkleinerung	– Bisher keine Verwertung
Filterstäube (10–50)	Vermeidungsquoten sind abhängig von: – spezifischer Leistung der Anlage (moderne Anlagen) – Produktpalette – erforderlicher Technologie bzw. Produktionsverfahren – Personalqualifikation – Betriebsweise Die Vermeidung von Reststoffen ist möglich in dem Bereich von 5 bis 25 %.	– Inertisierung – Getrennthaltung	– Verfestigung/Pelletierung und Wiedereinsatz in Hochöfen – Wiedereindüsung in Kupolöfen* – Eindüsung in betriebseigene Induktionsöfen*

* Untersuchungsbedarf

Tab. 4-1: Übersicht zur Vermeidung, Behandlungsmaßnahmen und Verwertungsmöglichkeiten für Abfälle/Reststoffe aus Induktionsofen-Schmelzbetrieben

4.1 Vermeidung von Schlacken, Stäuben und Ofenausbrüchen aus Induktionsofenschmelzanlagen

Der Anfall der Schlacken, Stäube und Ofenausbrüche sowohl in Induktionstiegelöfen als auch in Induktionsrinnenöfen ist verfahrensbedingt und somit prinzipiell nicht vollständig vermeidbar. Eine Maßnahme zur Vermeidung wirkt sich fast immer auf sämtliche Reststoffe aus. Bei der Durchführung der folgenden Maßnahmen kann von einem Vermeidungspotential von ungefähr 5 bis 25 % ausgegangen werden.

VERMEIDUNGSMASSNAHMEN IN INDUKTIONSSCHMELZANLAGEN	
a)	Saubere Einsatzstoffe
b)	Optimierte Fahrweise mit geringer Überhitzung
c)	Umstellung von Netzfrequenz- auf Mittelfrequenzöfen
d)	Geschlossene Ofenfahrweise und Herstellung von reduzierender Atmosphäre
e)	Oxidierende Einsatzstoffe abdecken
f)	Widerstandsfähigere Ausmauerungen oder Tiegel einsetzen

a) Saubere Einsatzstoffe

Alle Stoffe, wie Verunreinigungen, Eisenoxide (Rost) und andere Fremd- oder Störstoffe, die nicht in das gewünschte Flüssigeisen eingehen, werden in die Schlacke eingebunden oder verlassen die Anlage als Stäube. Verunreinigungen wie z. B. Beschichtungsmaterialien von Blechteilen können sich nachteilig auf die Verwertungs- und Entsorgungsmöglichkeiten auswirken.

Deshalb ist der Einsatz von verschmutzten oder oxidierten Materialien zu minimieren. Die Reinigung von Schrott und Rücklaufmaterial und von Anhaftungen wie Sand und Oxiden erfolgt durch gründliches Ausklopfen der Teile und durch Strahlen. Außerdem werden feuchte Einsatzstoffe getrocknet und vorgewärmt, die Abluft wird abgesaugt und in Filteranlagen gereinigt. Dabei verlagert sich der Abfall von den Schlacken zu den Stäuben aus der Trocknungsanlage. Durch Strahlen der Einsatzstoffe enstehen Strahlrückstände, die ebenfalls entsorgt werden müssen.

Zum Erreichen der geforderten Schmelzqualität ist das Einsetzen von sauberem Material in jedem Fall von Vorteil. Durch Reinigen und Trocknen der Einsatzsstoffe werden geringere Schlacken- und Staubmengen erzeugt.

b) Optimierte Fahrweise mit geringer Überhitzung

Jede unnötige Überhitzung der Schmelze und zu langes Warmhalten des Flüssigeisens bedingen einen stärkeren Abbrand der eingesetzten Materialien, der Ofenausmauerungen und der Tiegel. Dies führt zu einer zunehmenden Oxidation der Schmelze und somit zu einer höheren Reststoff-/Abfallmenge.

Die Zeiten, in denen das Material warmgehalten und überhitzt werden muß, sind durch optimierte Chargierrhythmen und -mengen der Einsatzstoffe und die zeitgerechte Abnahme des Schmelzgutes aus dem Schmelzofen auf ein Minimum zu beschränken. Zur Kontrolle der Schmelztemperaturen und zur Verringerung der Überhitzungszyklen sind Leistungsbegrenzungsschalter nützlich, die dem Bedienungspersonal die Temperaturführung erleichtern. Moderne Anlagen werden durch Prozessoren gesteuert und überwacht.

Dadurch lassen sich die Schlacken-, Staub- und Abbrandmengen der Ofenausmauerung verringern.

c) Umstellung von Netzfrequenz- auf Mittelfrequenzöfen
Netzfrequenzöfen erfordern ein langsames und energieaufwendiges Anfahren mit einem Anfahrblock. Deshalb werden diese Öfen mitunter nachts warmgehalten, obwohl die meisten kleinen und mittleren Betriebe nur ein- bis zweischichtig Flüssigeisen vergießen. Dabei entstehen durch verfahrensbedingte Oxidationsvorgänge zusätzlich Schlacken, Stäube und Ofenfutterabbrand.

Mittelfrequenzöfen können ohne Anfahrblock schnell mit losem Einsatzmaterial in Betrieb genommen werden. Dies hat vor allem Vorteile für Gießereibetriebe, die nur ein- oder zweischichtig arbeiten, oder bei der Herstellung von ständig wechselnden Gußsorten. Mit dem Einsatz von Mittelfrequenzöfen werden die Bereitstellungsphasen der Schmelzen beträchtlich verkürzt und die Flexibilität der Schmelzanlagen erhöht. Aufgrund der Flexibilität werden MF-Öfen bei der Nebenbeschaffung in vielen Fällen bevorzugt eingesetzt.

Außer der Vermeidung von Schlacken, Stäuben und Abbrand sind vor allem auch Energieeinsparungen möglich. Mittelfrequenzöfen bieten eine höhere Leistungsdichte. Dadurch wird weniger Flüssigeisen oxidiert aufgrund der geringeren Schmelzzeiten und der kleineren Badoberfläche.

Beim Duplexbetrieb mit dem Kupolofen wird weiterhin der NF-Tiegelofen eingesetzt.

d) Herstellung reduzierender Atmosphäre und geschlossene Ofenfahrweise
Bei **Schmelzöfen** muß im allgemeinen sowohl bei der Beschickung der Einsatzstoffe als auch bei der Entnahme des Flüssigeisens der Ofendeckel geöffnet werden, wodurch die Schmelze mit Luft in Berührung kommt. Geeignete Maßnahmen zur Vermeidung der Oxidationsvorgänge sind Technologien zur schnellen Erzeugung von reduzierender Atmosphäre nach jedem Beladungs- oder Entladevorgang. Zusätzlich sind Abgießtechnologien zu verwenden, bei denen der Ofen nur gekippt, aber nicht geöffnet wird. Das Abgießen der Schlacken und Schmelzen erfolgt über eine Vergießschnauze. Durch Verringerung der oxidierenden Ofenatmosphäre sind Schlacken- und Staubentstehung verringerbar.

Dies erfolgt bei geschlossen betreibbaren **Vergießöfen** (= Warmhalteöfen) mit inerten Gasen (z. B. Stickstoff). Hier wird das Flüssigeisen mit einem Druckpolster beaufschlagt und ohne Öffnen des Ofens abgegossen. Das Flüssigeisen steht unter einer reduzierenden Ofenatmosphäre, wodurch die Oxidation des Flüssigeisens vermieden wird. Es entstehen deshalb nur sehr geringe Mengen an Schlacken und Stäuben. Es können aber schon in einer oxidierenden Ofenatmosphäre auch einfache Maßnahmen wie z. B. Öffnen des Ofendeckels nur beim Befüllen oder Abdichtung von Lecks die Reststoff-/Abfallmengen verringert werden.

e) Oxidierbare Einsatzstoffe abdecken
Leicht oxidierbare Einsatzstoffe wie Kohlenstoff oder Chrom werden durch Abdeckmittel beim Schmelzen vor zu starker Oxidation geschützt, indem zuerst die leicht oxidierbaren Stoffe eingesetzt und die weniger stark oxidierbaren Stoffe darüber geschichtet werden. Außerdem sind desoxidierend wirkende Abdeckmittel im Handel, mit deren Einsatz der Oxidationsabbrand und somit die Schlacken- und Staubmengen verringerbar sind.

Die Abdeckmittel gehen in den Reststoff ein. Der vermiedene Verlust an Flüssigeisen durch Oxidation sowie ebenfalls Energieeinsparungen rechtfertigen den Einsatz von Abdeckmitteln.

f) Wahl der geeigneten widerstandsfähigen Ausmauerungen und Tiegel
Aus metallurgischen Gründen bestehen die Auskleidungen von Schmelzöfen für GGL und GGG aus sauren quarzitischen Massen. Dadurch findet z. T. eine gewollte Reaktion zwischen den SiO_2-Bestandteilen des Futters und dem Kohlenstoff statt. Dabei ist eine metallurgisch bedingte Bildung von Schlacken nicht zu vermeiden. Durch den Einsatz geeigneter Zustellun-

gen bzw. Ofenausmauerungen wie Tiegel, Stampfmassen lassen sich Abbrandverluste verringern. Die verschiedenen Zustellungsstoffe sind in Abschnitt 2.5 beschrieben. Der Stampfmassenverbrauch beträgt lt. Betreiberaussagen für NF- und MF-Öfen bis ca. 2 kg pro Tonne Flüssigeisen.

Zur Verringerung der Ofenausbrüche kann unter bestimmten Umständen anstelle der Erneuerung oder Neuzustellung der Ofenausmauerung die abgenutzte oder beschädigte Ofenwand nur abgeschält und neu aufgetragen werden. Allerdings ist diese Maßnahme wegen der Betriebssicherheit gegen Ofenwanddurchbrüche nur begrenzt anzuwenden.

Weitere Maßnahmen gegen frühzeitigen Tiegelwechsel und somit für Vermeidung von Reststoffen sind:

- Vermeiden von langem Halten bei hoher Temperatur,
- Verwenden einer dem Ofengang entsprechenden Stampfmasse mit angepaßtem Borsäurezusatz,
- Ofenentleerung bei Erreichen der erforderlichen Schmelztemperatur,
- Rechtzeitiges Abschlacken bei Schlackenanfall,
- Beschickung nur bei Betriebstemperatur,
- Temperatur- und zeitgesteuertes Sintern der Ofenausstampfung.

4.2 Aufbereitung der Reststoffe

Die Reststoffe sind im allgemeinen nur verwertbar, wenn sie aufbereitet werden. Vor der Aufbereitung müssen die stofflichen Eigenschaften aller Reststoffe durch Analysen/Gutachten ermittelt werden.

4.2.1 Aufbereitung von Schlacken

Grundsätzlich sind nach den bisherigen Eluatbeurteilungen die Schlacken aus Induktionsöfen weitestgehend inert. Sie haben aber nach dem Abschlacken meistens nicht die geforderten technologischen Eigenschaften zur direkten Verwertung. Sie sind ungleichmäßig groß und oft von ausgehärteten Schaumablagerungen und Gußeiseneinschlüssen durchsetzt. Deshalb müssen sie aufbereitet werden. Folgende Aufbereitungsmaßnahmen ermöglichen die Verwertung der Schlacken:

AUFBEREITUNG VON SCHLACKEN AUS INDUKTIONSOFENSCHMELZANLAGEN	
a)	Verbesserte Abschlacktechniken
b)	Getrennthaltung der Schlacken verschiedener Herkunft
c)	Mechanische trockene Zerkleinerung
d)	Zwischenlagerung zur Ausreaktion der Schlacken

a) Verbesserte Abschlacktechniken
In vielen Fällen werden die Schlacken vor dem Abgießen mit einem Krammstock (Abschlackschaufel) von der Schmelzoberfläche abgezogen. Dabei gelangen oft noch beträchtliche Flüssigeisenmengen vermischt mit den schaumartigen Anteilen der Schlacke in die Schlackenbehälter. Durch sorgfältiges Arbeiten beim manuellen Abziehen der Schlacke läßt sich der metallische Anteil in der Schlacke senken.

b) Getrennthaltung der Schlacken verschiedener Herkunft
Die Abnehmer und Verwerter von Schlacken fordern einheitliche Schlacken mit gleichbleibenden technologischen Eigenschaften wie Festigkeit und Eluierverhalten sowie ähnliche stoffli-

che Zusammensetzung. Voraussetzung ist die getrennte Sammlung der Schlacken nach gleicher Werkstoffgruppe und Zustellungsart.

Die Schlackenmengen aus kleinen und mittleren Betrieben sind gering. Aus diesem Grunde bietet sich die gemeinsame Verwertung von ähnlichen Schlacken aus verschiedenen Gießereibetrieben an.

Die weiteren im folgenden genannten Aufbereitungsschritte sollten daher aus Gründen der Wirtschaftlichkeit in den entsprechenden Verwerterbetrieben erfolgen.

c) Mechanische trockene Zerkleinerung
Die abgezogene Schlacke wird im allgemeinen in gußeiserne Wannen geleitet, die vor den Öfen aufgestellt sind. In den Wannen erstarrt die Schlacke zu unterschiedlich großen Schlakkestücken. Die Schlacken sind in dieser Größe und Form nicht verwertbar. Sie müssen durch mechanische Zerkleinerungsaggregate in ein gleichmäßiges Korngrößenspektrum umgewandelt werden. Die mechanische Zerkleinerung ist Stand der Technik.

d) Zwischenlagerung zur Ausreaktion der Schlacken
Nach dem Abschlacken reagieren die Schlacken mitunter nach, auch wenn sie bereits abgekühlt sind. Dies gilt vor allem für Schlacken aus Schmelzen, bei deren Entschwefelung Calcium-Karbide entstehen. Sie verändern ihre stoffliche Zusammensetzung, ihr Verhalten gegenüber Eluation sowie ihre technologischen Eigenschaften und unterliegen erfahrungsgemäß für einige Zeit einem Wandel. Deshalb sind diese Schlacken zwischenzulagern, bevor sie verwertet oder deponiert werden. Dies trifft für saure Induktionsofenschlacken nicht zu.

4.3 Verwertung der Reststoffe aus Induktionsofenschmelzanlagen

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 Verwertung von Schlacken

Die aufbereiteten Schlacken aus Induktionsöfen sind weitgehend wiederverwertbar. Das Verwertungspotential wird auf 60–90 % geschätzt.

In den folgenden Bereichen lassen sich entsprechend aufbereitete Schlacken wiederverwenden. Es besteht hinsichtlich der Einsatzgebiete Untersuchungsbedarf.

VERWERTUNG VON SCHLACKEN AUS INDUKTIONSOFENSCHMELZANLAGEN	
a)	Unterbaumaterial im Straßenbau
b)	Als güteüberwachte Beimengungen zu natürlichen Mineralstoffen
c)	Zuschlagstoffe für Fertigbetonteile in der Bauindustrie

a) Unterbaumaterial im Straßenbau
Voraussetzung für den Einsatz im Straßenbau als Tragschicht ohne Bindemittel oder in Asphaltschichten für Straßen aller Bauklassen ist

- die Sicherstellung einer gleichmäßigen und anforderungsgerechten Einhaltung der granulometrischen Eigenschaften (Korngrößenverteilung, Kornform) durch gezielte Aufbereitung,
- die Einhaltung einer Lagerzeit von ca. 6 Monaten zur Gewährleistung ausreichender Raumbeständigkeit bei nicht sauren Schlacken,
- die Beachtung der technischen Lieferbedingungen für Schlacken.

b) Beimengung zu natürlichen Mineralstoffen
Schlacken können unter Beachtung der Technischen Lieferbedingungen für Mineralstoffe als Beimengungen bis zu üblicherweise 20 % den natürlichen Mineralstoffen wie Steinen nach Aufbereitung zugegeben werden.

c) Zuschlagstoffe für Fertigbetonteile der Bauindustrie
Ebenso sind Gutachten zum Einsatz von Schlacken als Beimengung zur Herstellung von Fertigbetonteilen anzufertigen. Dabei sind besonders die Auswirkungen der Schlacken auf mögliche gasförmige Schadstoffemissionen zu untersuchen. Eine wichtige Voraussetzung für diesen Einsatzzweck ist die vollständige Ausreaktion aller Stoffe in den Schlacken durch mehrmonatige Lagerung. Im allgemeinen geht man von einer Lagerzeit von ca. 6 Monaten aus.

4.3.3 Verwertung von Stäuben

Die Stäube aus Induktionsofenschmelzanlagen werden derzeit in den wenigsten Fällen verwertet. Sie müssen mit zunehmenden Entsorgungskosten abgelagert werden. Deshalb müssen geeignete Einsatzbereiche ausfindig gemacht werden. Voraussetzung ist die Kenntnis über die Zusammensetzung und Beschaffenheit der Stäube.

Nachdem die Stäube getrennt gesammelt sind, ist ihr Wiedereinsatz bzw. die Verwertung in folgenden Bereichen möglich bzw. der Verwertungsweg ist zu untersuchen:

VERWERTUNG VON STÄUBEN AUS INDUKTIONSOFENSCHMELZANLAGEN	
a)	Wiedereinschmelzen von eisenhaltigen Stäuben in Hüttenwerken (extern)
b)	Eindüsen der Stäube in Kupolöfen
c)	Eindüsen in betriebseigene Induktionsofen-Schmelzanlagen
d)	Eindüsen in Lichtbogenöfen (extern)

a) Wiedereinschmelzen von eisenhaltigen Stäuben in Hüttenwerken
Je nach Eisenoxid- oder Zinkgehalt bietet sich das Wiedereinschmelzen der Stäube in Eisenhüttenwerken an. Dazu müssen die Stäube gesintert werden, damit sie im Konverter in die Schmelze eintauchen können. Die Eisenmetalle gehen in die Hüttenwerkprodukte ein, die verbleibenden mineralischen Bestandteile gehen in die Schlacken über. Das Sintern und Wiedereinschmelzen von Hüttenwerkstäuben ist bereits Stand der Technik.

b) Eindüsen der Stäube in Kupolöfen (siehe Abschnitt 8.4).

c) Eindüsen in betriebseigene Induktionsofen-Schmelzanlagen
Ziel der Wiedereindüsung von Stäuben in Induktionsöfen ist die Inertisierung der Stäube bei gleichzeitiger Nutzung der enthaltenen Wertstoffe. Es ist zu erwarten, daß die Eisenbestandteile zum großen Teil in das Flüssigeisen übergehen, während die nichtmetallischen Bestandteile in die Schlacke eingebunden werden. Das Eindüsen von Stäuben in Induktionsofen-Schmelzanlagen von Gießereien wird bisher noch nicht im Betriebsmaßstab praktiziert. Die Auswirkungen auf den Ofenbetrieb und das Schmelzprodukt sind daher noch zu untersuchen.

d) Eindüsen in Lichtbogenöfen (extern)
Stäube können in der Regel ohne Aufbereitung der Verwertung im Lichtbogenofen zugeführt werden. Die Stäube werden durch Einblasen in die Schmelze dem metallurgischen Prozeß zugeführt. Die Anwendung für Stäube aus betriebsfremden Anlagen bedarf der Untersuchung. Das Wiedereindüsen von Stäuben in Lichtbogenöfen ist Stand der Technik.

4.3.4 Verwertung von Ofen- und Tiegelausbrüchen

Die Verwertung von Ofenausmauerungsmaterialien aus Gießereibetrieben wird noch nicht praktiziert. Schwierigkeiten bei der Verwertung machen zum einen die technologischen Eigenschaften der Ofenausbrüche. Sie sind porös und demzufolge auch nicht in demselben Maße inert wie die Schlacken.

Bei Ofenausbrüchen mit schädlichen Verunreinigungen verhindern die Schadstoffgehalte eine Verwertung. Verfahren zur Schadstoffentfrachtung sind nicht bekannt. Außerdem sind Aspekte der Wirtschaftlichkeit und die Umweltverträglichkeit eines Verwertungsverfahrens zu berücksichtigen.

Teil B – Ist-Analyse des untersuchten Betriebes

5 Beschreibung des untersuchten Betriebes

5.1 Leistungsangebot

Das Unternehmen ist ein bedeutender Hersteller von Ventilsitzringen, Zylinderlaufbüchsen und Ventilführungen in Europa. Diese Gießereiprodukte sind Präzisionsbauteile, die in Verbrennungsmotoren zum Einsatz kommen. Das Unternehmen betreibt zur Erzeugung der verschiedenen Gußsorten eigene Schmelzereien.

In der untersuchten Schmelzerei sind Induktionstiegelöfen und Induktionsrinnenöfen im Einsatz, die das schmelzflüssige Eisen an die Form- und Schleudergießerei übergeben. Die Gießerei erzeugt die Rohlinge entweder im Schleudergußverfahren (zylindrische Hohlkörper) oder in geringerem Umfang im Sandgußverfahren (Stangenguß). Aus den Hohlkörpern und Stangen werden spanend die obengenannten Produkte gefertigt. Insgesamt erzeugt das Unternehmen jährlich ca. 50 Millionen Teile.

Das Gesamtunternehmen verfügt über eine Gußkapazität für Schleuder-, Sand- und Kokillenguß von ca. 13 000 t/a an 2 Produktionsstandorten. Die untersuchte Schmelzanlage erzeugte im Bezugsjahr 1989 ca. 3 870 t guten Guß.

5.2 Mitarbeiter

Insgesamt beschäftigte das Unternehmen Ende 1990 726 Personen. Es sind 11 Mitarbeiter direkt der zu untersuchenden Schmelzanlage zugeordnet. Darunter sind 3 Vorarbeiter, 7 Facharbeiter und 1 Schlosser.

5.3 Gebäude und Lager

Am untersuchten Standort befindet sich das Werk I mit der Hauptverwaltung, der Gießerei, der mechanischen Fertigung der Ventilsitzringe, einem Labor und Lagerstellen. Das Werk I befindet sich in einer Randlage im Gewerbegebiet ca. 100 m vom Wohngebiet und 40 m vom Mischgebiet entfernt.

Das Werk II fertigt Ventilführungen und Kolbendichtringe. Das Gebäude wurde 1971 erworben und 1981 durch einen Neubau wesentlich erweitert und modernisiert.

Das untersuchte Werk III fertigt ausschließlich Schleuder- und Formguß unter Verwendung von elektrisch betriebenen Schmelzöfen. Der Betrieb wurde 1980 auf den modernsten Stand der Schleudergußtechnik gebracht. Das Werk III befindet sich ca. 150 m vom Wohngebiet und etwa 20 m vom nächsten Nachbarn im Gewerbegebiet entfernt. Ein Grundriß des Gebäudes und die Anordnung der Arbeitsbereiche der Schmelzerei sind in Abbildung 5-1 gezeigt. Die Schleudergießerei und der Formguß grenzen produktionsbedingt an die Schmelzerei an.

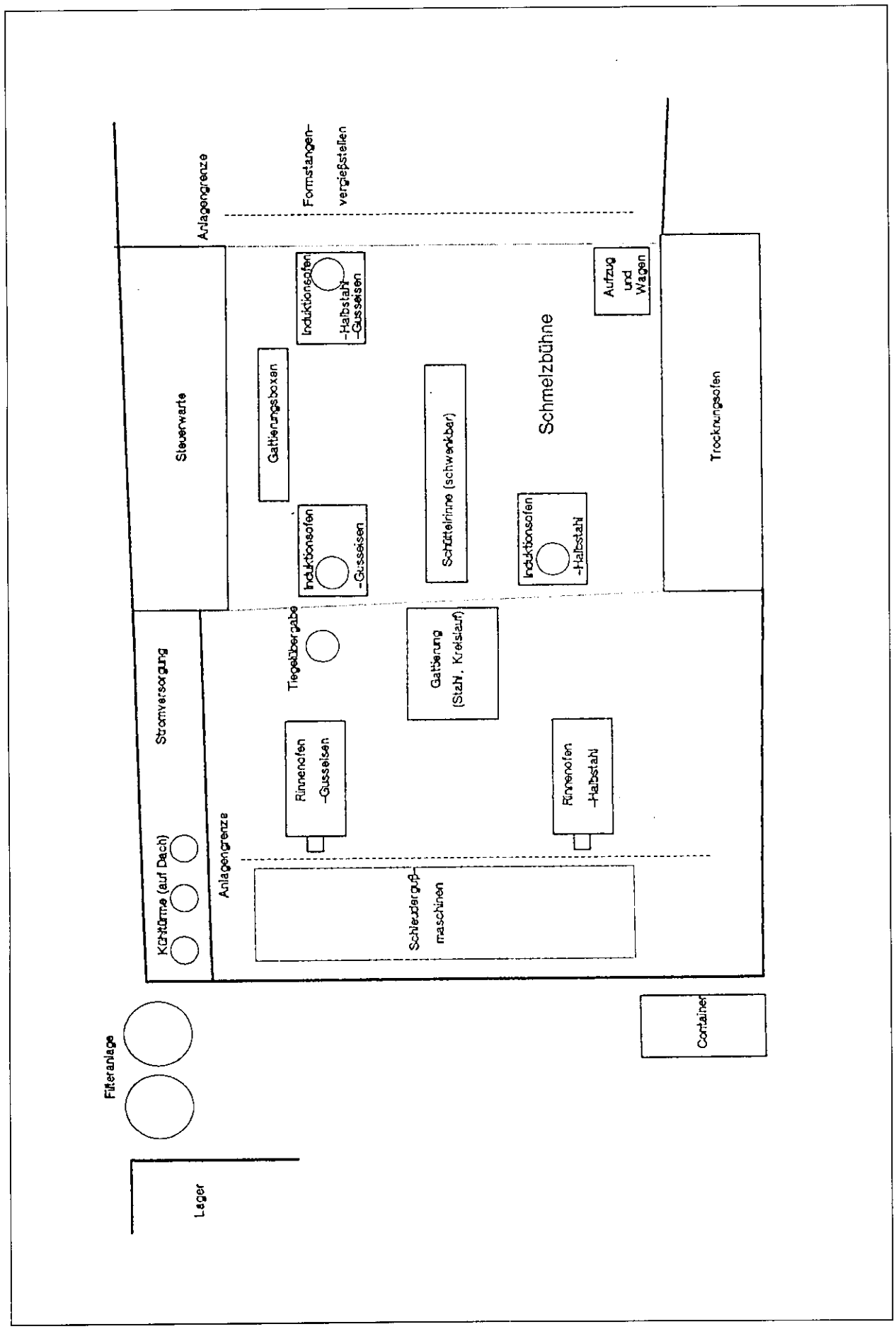


Abb. 5-1: Gebäudegrundriß des untersuchten Betriebes und Anordnung der Arbeitsbereiche

Die 3 Induktionstiegelöfen mit den Schwingrinnen und der Krananlage bilden mit den Gattierungsbehältern für Zuschlagstoffe und der Steuerungswarte den Kern der Schmelzanlage. Daran grenzen die 2 Induktionsrinnenöfen und die Trocknungsanlage an.

5.4 Maschinelle, apparative und sonstige Ausstattung

Anzahl	Aggregate	Hersteller	Technische Daten	Baujahr	Beschreibungen
3	Netzfrequenz-Induktionstiegelöfen	DEMAG	900 kW	1980	4 t Kapazität je Ofen
3	Tiegel	–	Oben offene runde Behälter mit Halteösen	–	Zur Übergabe des Flüssigeisens in die Rinnenöfen
2	Induktionsrinnenöfen	INDUGA	130 kW	1985	2 t Nutzinhalt je Ofen
1	Trocknungsanlage	SCHENK	–	1980	Fließbett mit 230 °C 5–6 t Roheisen/h 1–2 t Späne/h 2–4 t Stahlschrott/h
1	Schwingrinnen	–	–	–	Zur dosierten Beschickung der Einsatzmaterialien in die Induktionstiegelöfen
1	Abluftreinigungsanlage	LUHR	35 000 m^3/h	1980	Zweisträngig
1	Wärmerückgewinnungsanlage	–	–	1980	Zur Erwärmung von Sanitärwasser
1	Lagerhalle	–	Offene Halle im Betriebsgelände	–	Dient der Zwischenlagerung aller Einsatzstoffe
1	Gattierungsboxen	–	10 jeweils in etwa 0,8 m^3 große Boxen geteilte Behälter	–	Dient der Zwischenlagerung der Zuschläge auf der Ofenbühne
1	KV-Anlage	–	20 kV	1980	Stromversorgung
3	Hochspannungsregeltrafos	–	20 kV/1 000 V	1980	Stromversorgung der Schmelzaggregate
5	Container	–	6 m^3	–	Sammelstellen für sämtliche Abfälle
1	Kühlsystem	–	–	1980	Kühltürme auf dem Dach
1	Rohrpostanlage	–	–	1980	Für den schnellen Transport der Proben in das Labor

Tab. 5-1: Maschinelle und apparative Ausstattung

In der Schmelzerei sind 3 Netzfrequenz-Tiegelöfen installiert, die genehmigte Schmelzleistung der gesamten Anlage beträgt 7,5 t/h für Gußeisen und Stahl.

Die Übergabe der Schmelze von den Induktionstiegelöfen zu den Vergießöfen erfolgt in Pfannen mit Hilfe eines Laufkrans. Die Pfannen sind schwenkbar aufgehängt. Sie werden mit einem Trennmittel aus Kohlenstoff und Wasser eingestrichen (geschlichtet), damit die Schlacke sich nicht an der Pfannenwand festsetzt. Die Schmelze im Induktionsrinnenofen wird durch Stickstoffzugabe unter Druck in die Schleudergießmaschinen dosiert. Die Dosierung erfolgt wahlweise gewichts- oder zeitgesteuert.

Der Vergießofen funktioniert nach dem Teekannenprinzip. Das Eisen wird durch ein Stickstoffpolster nach unten und in die Gießschnauze gedrückt. Die jeweilig abzufüllenden Portionen werden über den Stopfen an der Gießschnauze portionsweise zum Abgießen in die Schleuderform bereitgestellt. Es wird immer ein Vergießofen als Reserve vorgehalten. Neben den drei Netzfrequenz-Tiegelöfen ist eine Schrotttrocknungsanlage, die im Fließbettverfahren arbeitet, installiert. Die Übergabe der getrockneten Materialien erfolgt über schwenkbare, verschiebbare Wagen bis zur Gattierungsstelle oder den Rüttelrosten. Zwischen den Netzfrequenz-Tiegelöfen sind 2 Schwingrinnen installiert, über die die Einsatzmaterialien in die Öfen dosiert eingeworfen werden. Die getrockneten Späne werden über einen Trichter in die Schwingrinnen geschüttet; die verschiedenen Schrottsorten und Rücklaufmaterialien werden mit der Krananlage in die Öfen eingefüllt.

Die Abluftabsaugung ist zweisträngig ausgelegt und hat eine Kapazität von 35 000 m^3/h. Die Grobstäube werden in einem Zyklon abgeschieden, die Feinstäube in Taschenfiltern.

Wärmerückgewinnungsanlage

- Eine Wärmerückgewinnungsanlage für Sanitärwasser (Duschwasser) verwertet die fühlbare Wärme der wassergekühlten Induktionsofenspulen.

- Die Induktionsöfen besitzen zwei Kühlkreisläufe. Ein Primärkreislauf befindet sich in den Spulen direkt und stellt einen eigenen, eigenständigen Kreislauf dar. Der Sekundärkreislauf gibt seine Wärme über einen Kühlturm auf dem Dach an Wärmetauscher ab. Einmal pro Jahr ist es erforderlich, die Wärmetauscher zu reinigen.

5.5 Ablauf der Arbeiten

Prinzipieller Arbeitsablauf beim Schmelzen
Der Arbeitsablauf zum Schmelzen von Flüssigeisen ist in der Abbildung 5-2 dargestellt.

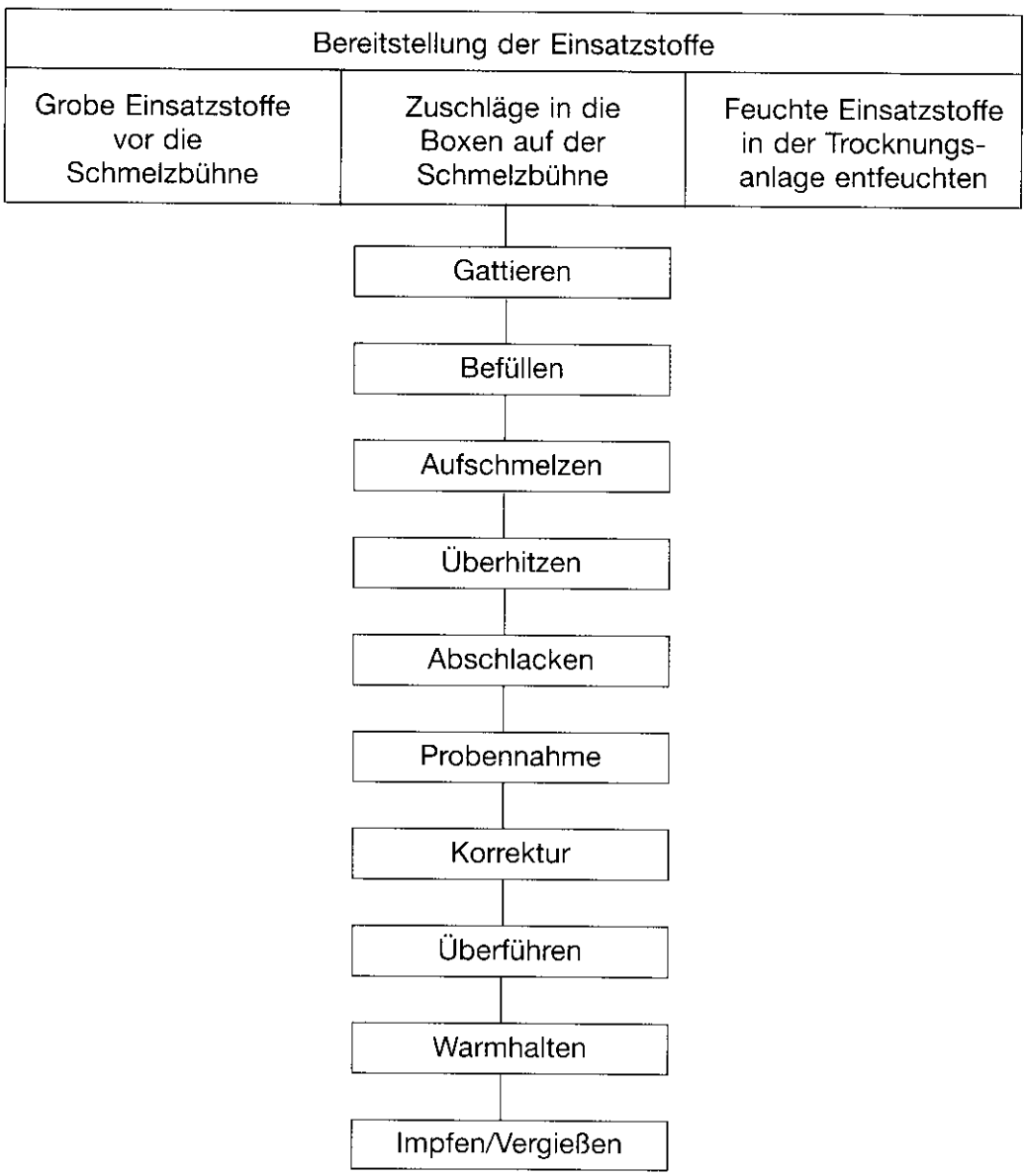


Abb. 5-2: Schematischer Ablauf der Arbeiten in der Induktionsschmelzanlage

Eine eigentliche Gattierungsanlage besteht nicht. Die Rezeptur wird zusammengemischt aus

- Gattierungsbox mit Fächern für die einzelnen Legierungsbestandteile,
- den auf der Bühne gelagerten Kreislaufmaterialien und Schrott,
- den getrockneten Materialien aus dem Schrotttrockner und
- von Zwischenlagerstellen unterhalb der Schmelzbühne vor den Elektroöfen.

Ölhaltige Späne werden nicht im eigenen Betrieb geröstet, sondern bei einem externen Aufbereiter. Diese werden in Big Bags angeliefert.

Das Kreislaufmaterial besteht im wesentlichen aus Trichtern, Ausschuß, Anwärmrohlingen, Abschnitten und Trennabschnitten.

- Trichter sind Einguß- und Speisesysteme der Formen.
- Ausschuß aus den Formkästen entsteht meistens beim Anfahren oder beim Zerbrechen von Formen.
- Anwärmrohlinge oder Vorwärmrohlinge sind zur Erwärmung der Schleudergußkokillen vorgesehen.
- Abschnitte sind nicht zerspanbare Teile der zu bearbeitenden Rohlinge.
- Trennabschnitte sind ebenfalls nicht zu bearbeitende Teile bei der mechanischen Bearbeitung.

Mit der Waage verwogen werden nur die Legierungsbestandteile wie Kohle, Silizium-Carbid, Ferro-Phosphor, Mangan und Ferrosilizium, die in kleineren Mengen als Einsatzstoff den Schmelzen zuchargiert werden. Die Mengen der übrigen Einsatzstoffe wie sortengleicher Kreislauf, Späne und Roheisen werden von den Schmelzern geschätzt.

Die Schmelze im Induga-Vergießofen wird regelmäßig beprobt, denn die Zusammensetzung kann sich durch das Zugießen verschiedener Legierungszusammensetzungen etwas verändern. Nur der Gehalt des Kohlenstoffs im Vergießofen ändert sich geringfügig durch Abbrand. Die Abweichungen werden dann im Schmelzofen korrigiert.

Der Vergießofen wird in der folgenden Weise beprobt:

- 3 Proben pro Schicht bei dem hochlegierten Guß (Halbstahl)
- 4 Proben pro Schicht bei den niedriglegierten Schmelzen (Grauguß)

Folgende Schmelzprodukte werden in den Schmelzaggregaten erzeugt:

1. Formgußseite der Gesamtanlage (1 Induktionsofen produziert wechselweise)
- Produktionslinie 1: Grauguß
- Produktionslinie 2: hochlegierter Guß

2. Schleudergußseite der Gesamtanlage (2 Induktionsöfen und 2 Vergießöfen)
- Produktionslinie 3: Grauguß
- Produktionslinie 4: hochlegierter Guß

Die Arbeitsabläufe in der Schmelzanlage ergeben sich prinzipiell aus der Anordnung der verschiedenen Produktionslinien. Für den **Formguß** ist auf der anderen Seite der Schmelzbühne ein eigenes Schmelzaggregat in Betrieb. Für den **Schleuderguß** bestehen zwei Produktionslinien aus je einem Netzfrequenzinduktionstiegelofen und einem „Induga"-Induktionsrinnenvergießofen.

Schmelzzyklen in den 4 Produktionslinien der Schmelzanlage
Der Betrieb produziert im Zweischichtbetrieb. In der Nacht wird eine Ofenfüllung mit verminderter Belegschaft für die Frühschicht vorbereitet.

Die nachfolgende Übersicht zeigt die prinzipielle Fahrweise der Schmelzaggregate, die je nach Produktionsbedarf variiert wird.

Produktionslinie	Vergießart	Gußart	Produktform	Induktionstiegelöfen Chargen (je 1,3 t) Morgens	Mittags	Nachts	Flüssigeisen t/d
1	Formguß	Grauguß (Pl 104, Pl 106)	Stangen	2 × 3 t	3 × 3 t	1 × 3 t	24,0
2	Formguß	hochleg. Guß (Pl 12.12, Pl 20, Pl 33)	Stangen	2 × 2 t	wöchentlich		ca. 0,8
3	Schleuderguß	Grauguß (Pl 1, Pl 7)	Rohre	2 × 1,3 t	1 × 1,3 t	1 × 1,3 t	5,2
4	Schleuderguß	hochleg. Guß (Pl 12, Pl 33)	Rohre	3 × 1,3 t	2 × 1,3 t	1 × 1,3 t	7,8
Schmelzgutgesamtmenge							37,8

Tab. 5-2: Schmelzprogramm und Schmelzleistungen der einzelnen Produktionslinien

In den Induktionsrinnenöfen wird das fertige Flüssigeisen warmgehalten. Diese Öfen werden nach Ende der Spätschicht leergefahren und nachts warmgehalten.

Beim Schleuderguß werden verschiedene Stückgewichte geschleudert, wodurch sich Variationen sowohl bei der Mengenzugabe als bei den Schmelzzyklen ergeben können.

Arbeitsablauf eines Wochenzyklus am Beispiel der Produktionslinie 4
Nachfolgend wird ein Wochenzyklus der Produktionslinie 4 für hochlegierte Werkstoffe dargestellt, die mit sehr viel Chrom zwischen 12 und 33 % erschmolzen wird. Beim Schmelzen dieser Legierungen ist der Ausmauerungsverbrauch aus Gründen der Chemie, der Temperatur und des mechanischen Abriebs größer als bei den anderen Produkten. Der Ofen wird praktisch jede Woche ausgebrochen und das Futter erneuert.

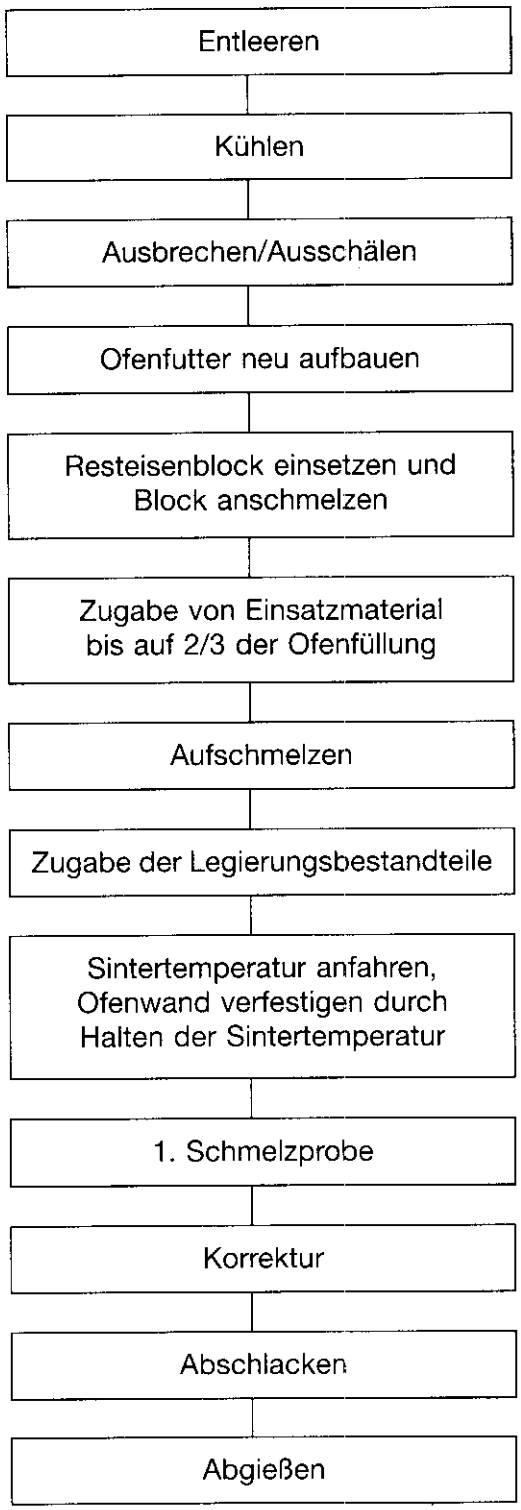


Abb. 5-3: Wöchentliches Abfahren, Ausbrechen, Neuaufbau und Anfahren eines Induktionstiegelofens

Wartungsarbeiten

Zum sicheren Betrieb der Schmelzanlage wird eine regelmäßige Wartung und Instandsetzung durchgeführt. Bei den Wartungsarbeiten werden Bauteile ausgetauscht oder Reinigungsarbeiten durchgeführt. Dabei sind Reststoffe verschiedenster Art zu entsorgen. Es handelt sich im wesentlichen um Stäube, Öle, Fette, Tiegelreste, Ausbruchreste, Kabel, Drähte, Verpackungen oder funktionsuntüchtige Bauteile der Gesamtanlage.

6 Stoffbilanzen

Die Bilanzierung der Einsatzstoffe, Hilfsstoffe und der eingesetzten Energien und ihre Verteilung auf Produkte und Reststoffe wie Abfall, Abluft und Abwasser dient dazu, einen Überblick über die Stoffflüsse eines Betriebes oder Betriebsteiles zu geben und den Verbleib der Einsatzsstoffe transparent zu machen. Schon aus der systematischen Aufstellung der Einsatzstoffe können sich entscheidende Anregungen zur Abfallvermeidung und -verwertung sowie zur Schadstoffentfrachtung der anfallenden Abfälle/Reststoffe ergeben. Reststoffe sind Stoffe nach § 2 Abs. 3 (AbfG), die keine Abfälle im Sinne dieses Gesetzes sind, sondern als überwachungsbedürftige Reststoffe verwertet werden sollen. Diese Stoffe sind der Anlage der Reststoffbestimmungs-Verordnung (RestBestV) mit Reststoffschlüsseln zu entnehmen.

Reststoffe aus genehmigungspflichtigen Anlagen sind gemäß § 5 Abs. 1 Satz 3 BImSchG vorrangig zu vermeiden; wenn dies nicht möglich ist, zu verwerten; wenn die Vermeidung und Verwertung technisch nicht möglich oder zumutbar sind, sind sie als Abfälle ohne Beeinträchtigung des Wohls der Allgemeinheit zu beseitigen.

Im vorliegenden Fall wird ein Betriebsteil (Werk III) der Gesamtgießerei als Bilanzraum gewählt. Die Stoffströme sind in der Abbildung 6-1 im Überblick dargestellt. Die Abbildung 6-2 zeigt das Mengenfließbild der untersuchten Induktionsofenschmelzanlage. In der Tabelle 6-1 sind die Einsatzstoffe und in Tabelle 6-2 die Reststoffe für den Bilanzierungszeitraum 1990 aufgeführt. Erläuterungen zu den einzelnen Stoffarten sind den Tabellen beigefügt.

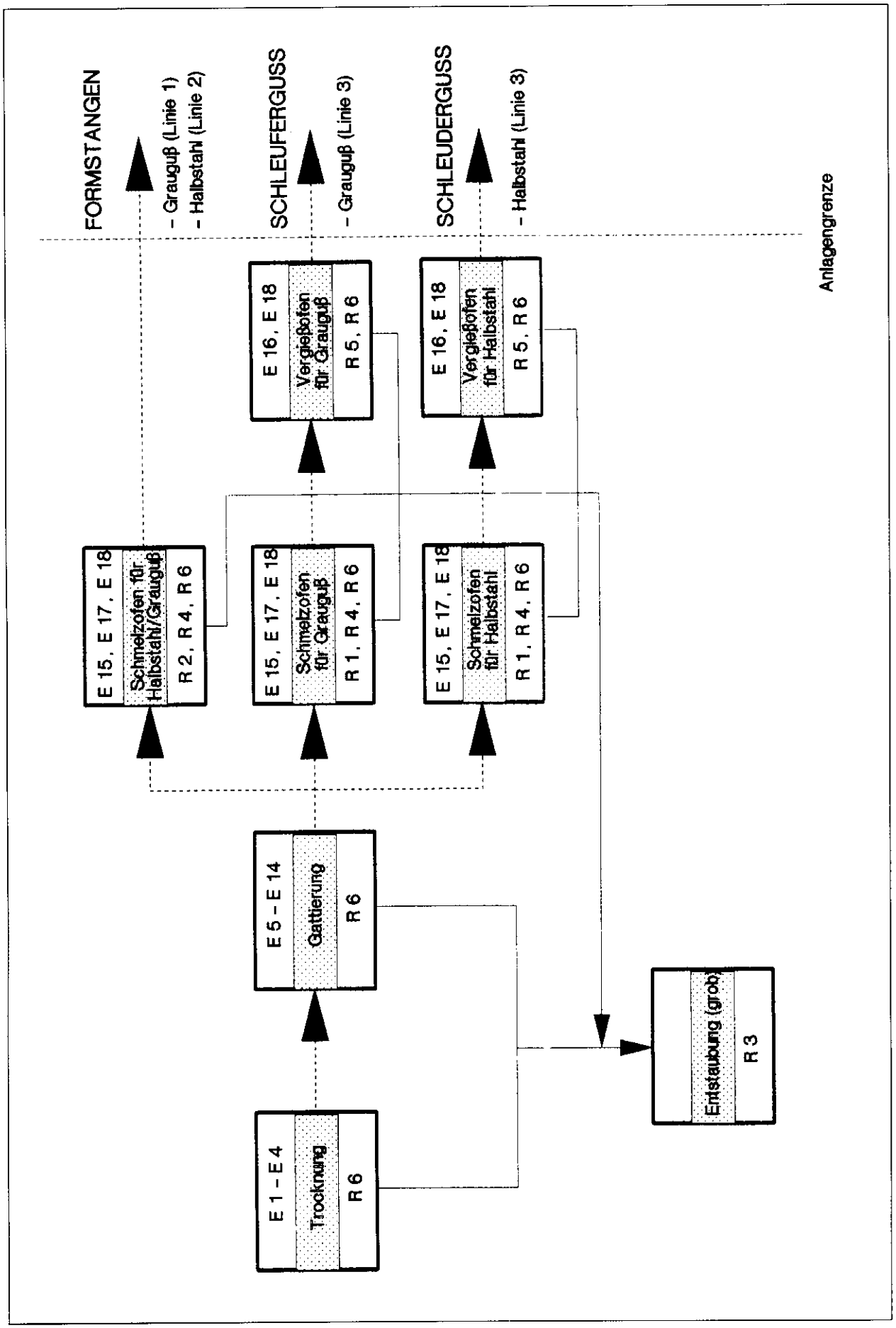


Abb. 6-1: Schematischer Überblick über die Stoffströme

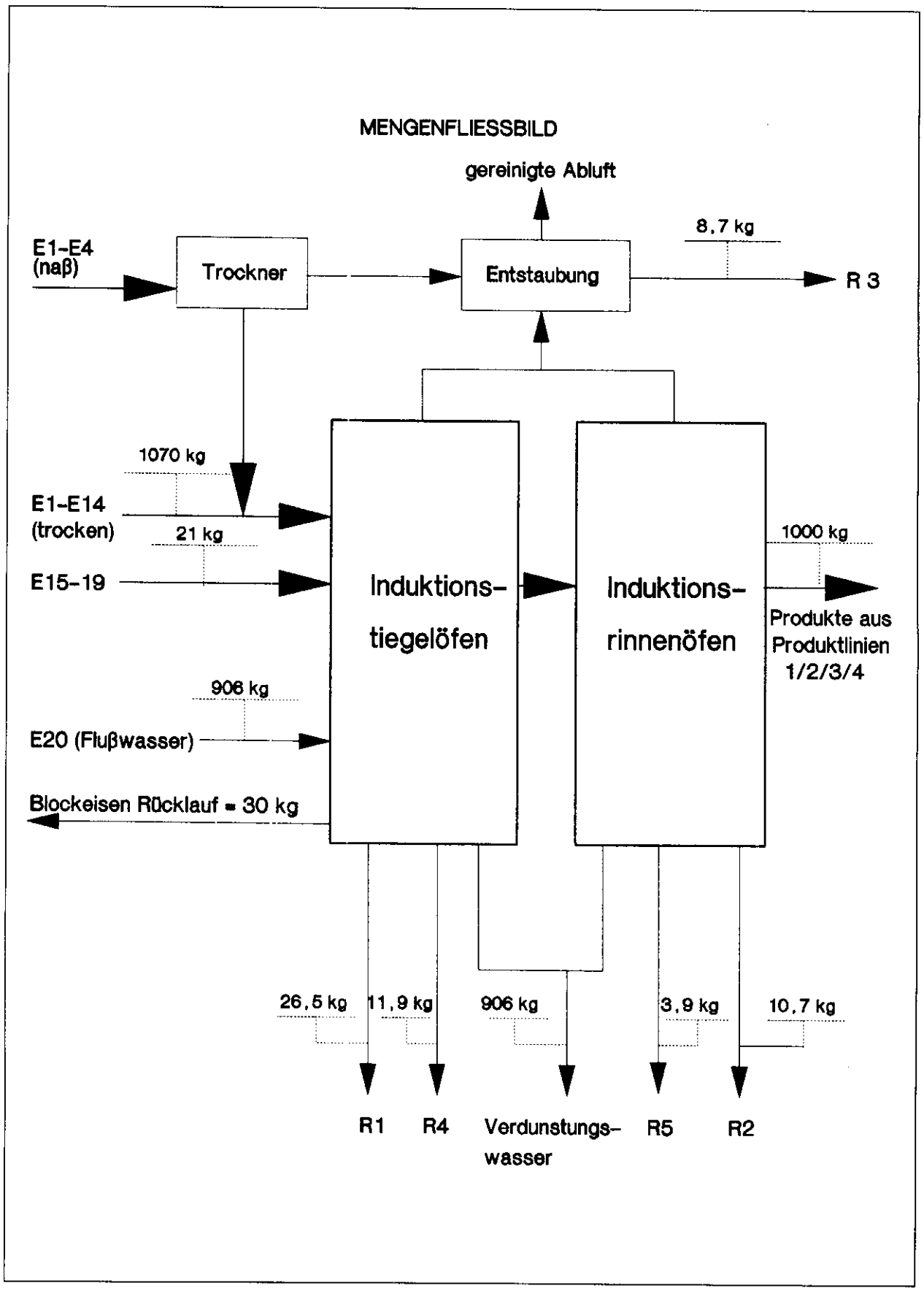


Abb. 6-2: Mengenfließbild der Induktionsofenschmelzanlage mit spezifischen Mengenangaben, bezogen auf 1 t Gußeisenprodukte

Lauf. Nummer	Einsatzstoff (genaue Bezeichnung)	Zusammensetzung	Einsatzort (Anlagenteil)	Verwendungszweck als Einsatzstoff	Einsatzmengen (Tonne, m^3, MWh pro Jahr)	Kosten der Einsatzstoffe DM pro Tonne	Produkte
E 1	Roheisen	4 % C 2 % Si Rest Fe	NF-Tiegelofen	– Eisenträger	1 000 t	500	Insgesamt werden 4 Produktarten in 3 Linien erzeugt
E 2	Stahlschrott	0,3 % C 0,3 % Si Rest Fe		– dito	1 000 t	265	Formstangen P 1 = Grauguß
E 3	Kreislauf stückig a)–d): sind z. B.: – Trichter – Ausschuß – Abschnitte – Anwärmrohlinge – Trennabschnitte aus eigener Produktion	a) 3 % C 2 % Si 0,5 % Mn 0,7 % P b) dt. aber 0,4 % P 0,5 % Cr 1 % Ni 1 % Mo c) 2 % C 1 % Si 0,5 % Mn 0,05 % P 12 % Cr 2 % Mo d) dto. aber 33 % Cr		– dito	2 800 t	–	P 2 = Halbstahl Schleuderguß P 3 = Grauguß P 4 = Halbstahl Gesamtmenge 3 870 t/a guter Guß
E 4	Späne aus eigener Produktion	wie lfd. Nr. 3		– dito	1 100 t	167	
E 5	Elektrodengraphit	> 90 % C + Asche		– Legierungszuschläge	50 t	1 300	
E 6	FeSi	75 % Si 25 % Fe		– dito	18 t	1 400	

Tab. 6-1: Einsatzstoffe und deren Verbleib (Blatt 1)

Lauf. Nummer	Einatzstoff (genaue Bezeichnung)	Zusammensetzung	Einsatzort (Anlageteil)	Verwendungszweck als Einsatzstoff	Einsatzmengen (Tonne, m^3, MWh pro Jahr)	Kosten der Einsatzstoffe DM pro Tonne	Produkte
E 7	FeMn	90 % Mn		dito	3 t	–	
E 8	FeP	25 % P		dito	20 t	800	
E 9	FeS	36 % S		dito	2 t	–	
E 10	FeCr	70 % Cr		dito	190 t	4 100	
E 11	Ni	100 % Ni		dito	7 t	14 500	
E 12	FeMo	65 % Mo		dito	26 t	14 000	
E 13	FeV	60 % V		dito	–	15 000	
E 14	Sn	100 % Sn		dito	4 t	15 000	
	Cu	100 % Cu				6 700	
E 15	Quarzitmasse	> 99 % SiO_2	NF-Tiegelofen	Hilfsstoffe	76 t	370	
E 16	Gießbeton Iracast LC 90 = LC 0900	77 % Al_2O_3 + TiO_2 8 % SiO_2 10 % ZrO_2 1 % CaO 4 % Cr_2O_3	Induktionsrinnenöfen	Feuerfeste Zustellung	20 t	2 070	
E 17	Schlackenbinder Remmos/Slax	75 % SiO_2 15 % Al_2O_3	NF-Tiegelöfen + NF-Rinnenöfen	Schlackenbinder	46 t	50	
E 18	Thermoelemente	Pt Pt/Rh Pappe		Temperaturmessung	–	10 000 (Hülsen)	
E 19	Strom		Tiegel- + Rinnenöfen	Stromversorgung	5 000 MWh (–1 200–1 500 kWh/t Guß)	–	
	Gas				–63 000 m_n^3 (16,8 m_n^3/t Guß)	–	
E20	Flußwasser		Kühlsystem	Wasserversorgung	5 460 m^3		

Tab. 6-1: Einsatzstoffe und deren Verbleib (Blatt 2)

Einsatzstoffe – Erläuterungen zu Tabelle 6-1

EISENTRÄGER

E 1 **Roheisen** wird mit der durchschnittlichen Menge von etwa 100 kg Roheisen/t Gußeisen in Form von Roheisen-Masseln mit 4 % Kohlenstoff, 2 % Silizium- und etwa 92 % Eisenanteilen eingesetzt. Masseln sind trapez- oder plattenförmige gekerbte oder ungekerbte Eisenblöcke mit Gewichten von einigen kg. Die **Roheisen-Masseln** werden im Hochofen aus Eisenerz hergestellt. Sie haben eine bekannte Analyse und keine störenden Begleitelemente.

E 2 **Stahlschrott** wird in Mengen von 50 bis 200 kg/t Gußprodukt mit 0,3 % Kohlenstoff-, 0,3 % Silizium- und über 99 % Eisenanteilen eingesetzt. Dem Stahlschrott sind außerdem Schienenschrott, Konstruktionsschrott und die Stanzabfälle zugeordnet. Bevorzugt werden Tiefziehbleche eingesetzt, weil diese Bleche sehr wenig Legierungsbestandteile enthalten.

E 3 **Kreislauf** sind Reststoffe aus der vergießenden, spanenden und umformenden Bearbeitung des eigenen Betriebes, wovon etwa 550 kg/t Gußprodukt zum Wiedereinsatz kommen. Ihr Wiedereinsatz erfolgt deshalb nur für dasselbe Zielprodukt, aus dem sie entstanden sind. Als Kreislaufmaterialien werden Gießereireststoffe wie Trichter, Ausschuß, Anwärmrohlinge, Abschnitte und Trennabschnitte zurückgeführt. Trichter sind Eingußsysteme und Speisesysteme der Formen; Ausschuß aus den Formkästen entsteht meistens beim Anfahren oder beim Zerbrechen von Formen; Anwärmrohlinge oder Vorwärmrohlinge sind zur Erwärmung der Schleudergußkokillen erforderlich; Abschnitte sind nicht zerspanbare Teile der zu bearbeitenden Rohlinge; Trennabschnitte sind ebenfalls nicht zu bearbeitende Teile bei der mechanischen Bearbeitung.

E 4 **Späne** fallen ebenfalls im eigenen Unternehmen bei der spanenden Bearbeitung an. Die spezifische Einsatzmenge beträgt bis 800 kg/t Gußprodukt. Die Späne haben dieselbe schwankende Zusammensetzung wie die Kreislaufmaterialien. Ihr Wiedereinsatz erfolgt für dasselbe Zielprodukt, aus dem sie entstanden sind. Sie werden von einem externen Aufbereiter für ca. 170 DM/t geröstet, d. h. von schädlichen Anhaftungen befreit. Außerdem trocknet der Betrieb feuchte Späne und feuchtes Einsatzmaterial in der Trocknungsanlage, die direkt neben der Schmelzanlage aufgebaut ist.

LEGIERUNGSZUSCHLÄGE

E 5 **Elektrodengraphit** wird aus amorphem Kohlenstoff (Anthrazit, Steinkohle, Koks), Sand und Eisenoxid bei hoher Temperatur im Lichtbogen gewonnen. Gemahlene Elektrographitabfälle dienen der Schmelzanlage als Aufkohlungsmittel (Graphitträger). Dabei kommen ca 10 kg Elektrodengraphit/t Gußprodukt zum Einsatz. Elektrodengraphit geht ausschließlich in das Gußprodukt ein.

E 6 **Ferrosilizium (FeSi)** dient der Einstellung des erforderlichen Siliziumgehaltes im Gußeisen. Silizium gelangt vorwiegend über das Roheisen, den Gußbruch und das Kreislaufmaterial in den Ofen. Bei hohem Stahlschrott- und Blecheinsatz muß zusätzlich Silizium zum Aufsilizieren des Stahlschrottanteils aufgegeben werden. Das Ferrosilizium geht in das Produkt und in die Schlacke ein.

E 7 **Ferromangan (FeMn)** wird mit einem Anteil von 90 % Mn und 10 % Eisen als Desoxidations- und Entschwefelungsmittel der Schmelze zugesetzt. Es wird in Hochöfen erzeugt und stückig angeliefert. Mangan hat eine 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 8 **Ferrophosphor (FeP)** ist eine Eisen-Phosphor-Vorlegierung mit 25 % Phosphor-, 0,7 % Silizium- und ganz geringen Kohlenstoffanteilen (unter 0,25 %), die als Phosphorträger zur Legierung der Schmelze verwendet wird. Ferrophosphor dient der Erhöhung der Verschleißfestigkeit für hochbeanspruchte Gußteile. Das Zulegieren von Phosphor stellt einen Sonderfall dar.

E 9 **Ferroschwefel (FeS)** ist eine Eisen-Schwefel-Vorlegierung und dient der gelegentlichen Schwefelgehaltanpassung.

E 10 **Ferrochrom (FeCr)** ist eine Eisen-Chrom-Vorlegierung. Chrommetalle sind sehr hart, spröde, silbrigglänzend und sind weder bei Raumtemperatur an der Luft noch unter Wasser oxidierbar. Für die hochbeanspruchten Stahlgußteile mit Chromgehalten zwischen 10 und 35 % wird Ferrochrom mit einem Chromgehalt von 70 % eingesetzt.

E 11 **Nickel** ist ein Legierungsmittel und wird als reines Nickel der Schmelze zugegeben. Nikkel ist silbrigweiß, polierfähig, ferromagnetisch und besitzt eine hohe Korrosionsbeständigkeit.

E 12 **Ferromolybdän (FeMo)** wird mit Anteilen von 65 % (Rest Eisen) als Legierungselement zur Verbesserung der Härtbarkeit, der Verschleißbeständigkeit, Warmfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit der Schmelze beigemengt. Es ist schwer schmelzbar (Schmelzpunkt 2 620 °C).

E 13 **Ferrovanadium (FeV)** wird als Vorlegierung mit 60 % Vanadium und 40 % Eisen zur Verbesserung der Zerspanfähigkeit, Wärmefestigkeit und der Glühfähigkeit der Schmelze beigegeben. Es ist ein sehr hartes, sprödes Metall von grauer Farbe und schmilzt bei 2 173 °C. Es geht fast vollständig in das Gußeisen ein und findet sich nur in geringen Mengen in den Reststoffen.

E 14 **Zinn (Sn)/Kupfer (Cu):** Als Legierungsbestandteil wird Zinn und Kupfer der Schmelze zur Perlit-Stabilisierung beigefügt.

ENERGIE/HILFSSTOFFE

E 15 **Quarzitmasse** wird aus dem Quarzit oder Quarzgestein gewonnen und als saure Stampfmasse mit einem Siliziumoxidanteil von 99 % verwendet. Die Masse wird durch Rütteln und Stampfen sehr gut verdichtet. Nach dem Trocknen (Sintern) muß die Stampfung eine hohe Beständigkeit gegen das Eindringen von Metall und Schlacke besitzen. Die Stampfmassen werden nach Gebrauch vor allem als Ofenausbrüche entsorgt. Außerdem geht ihr Abbrand in die Schlacken und Stäube über.

E 16 **Gießbeton** ist eine feuerfeste Gieß-, Stampf- oder Spritzmasse, bestehend aus körnigen Feuerfeststoffen und Korund. Er findet hier bei der Auskleidung der Rinnenöfen Verwendung.

E 17 **Schlackenbinder** sind Stoffe, die das Abziehen der Schlacken erleichtern. Sie bestehen im untersuchten Betrieb aus 75 % Siliziumoxiden, 15 % Aluminiumoxiden und sonstigen Beimengungen. Durchschnittlich werden 7 kg Schlackenbinder/t Einsatz eingesetzt, die in die Schlacken eingehen.

E 18 **Thermoelemente** erzeugen durch Erwärmung einen Stromfluß, mit dem die Temperatur im Ofen meßbar ist. Die gesamte Meßeinrichtung besteht aus Thermoelementenpaar, Anschlußstelle, Ausgleichsleitung, Zuleitungen, Temperaturmeßgerät und dem Abgleichwiderstand. Jährlich werden 10 000 Meßhülsen verbraucht, die mit dem Gewerbemüll entsorgt werden.

E 19 **Energieverbrauch:** Für die Haupt- und Nebenanlagen sowie die Infrastruktur werden vorwiegend elektrischer Strom und Stadtgas als Energieträger eingesetzt. Der Stromverbrauch beträgt beim Formguß 1 200 kWh, beim Schleuderguß 1 500 kWh pro Tonne guter Guß.

E 20 Kühlwasser dient der Kühlung der Schmelzöfen. Es wird im Kreislauf geführt. Das Wasser wird dem naheliegenden Fließgewässer entnommen, gefiltert, als Kühlmittel eingesetzt und nach Nutzung in Kühltürme geleitet. Das Verdunstungswasser wird ersetzt.

Reststoff-nummer	Reststoffbezeichnung	Abfallschlüs-selnummer	Zusammensetzung	Herkunft (Anlagenteil oder Infrastruktur)	Mengen/Jahr Volumen/Jahr Spez. Menge (bez. auf 3800 t/a guter Guß)	Entsorgungsweg	Entsorgungs-kosten (DM/Jahr; DM/t)
R 1	Elektroofenschlacke (p-arme Mischschlacke) – GG unlegiert – GG legiert – GS legiert	31 218	siehe Tabelle 6-6	Tiegelschmelzöfen (Demag)	133 t oder 116 m^3 oder 49 kg/t	Hausmülldeponie (HMD)	**Deponie:** 133 t × 55,10 DM/t = 7328 DM/a **Transport:** 27 × 57 DM/Mulde = 1540 DM/a
R 2	Elektroofenschlacke (p-reiche Mischschlacke) – 0,7 P – Pl 106	31 218	siehe Tabelle 6-6	Tiegelschmelzöfen (Demag)	54 t oder 47 m^3 oder 49 kg/t	Hausmülldeponie (HMD)	**Deponie:** 54 × 55,10 DM/t = 2975 DM/a **Transport:** 11 × 57 DM/Mulde = 627 DM/a
R 3	Staub aus Trocken- und Schmelzöfen	351 01	geschätzt 90 % Eisenoxid (Fe_xO_y) 10 % Legierungs-oxide	Trockenofen, Tiegel-schmelzöfen, Vergießöfen	44 t oder 44 m^3 oder 12,7 kg/t	Hausmülldeponie (HMD)	**Deponie:** 44 t × 79,30 DM/t = 3489 DM/a **Transport:** 7,3 × 62 DM/Mulde = 450 DM/a
R 4	Tiegelofenausbruch	311 03	siehe Tab. 6-6	Tiegelschmelzöfen (Demag)	60 t 50 m^3 16 kg/t	Hausmülldeponie (HMD)	**Deponie:** 60 t × 79,30 DM/t = 4758 DM/a **Transport:** 8,3 × 57 DM/Mulde = 475 DM/a
R 5	Vergießofenausbruch	31 103 (311 08)	geschätzt 57 % Al_2O_3 5 % SiO_2 7 % ZrO_2 (20 % Cr_2O_3)* 11 % FeO_x	Vergießöfen (Induga)	20 t oder 17 m^3 oder 5 kg/t	bisher Hausmülldeponie (HMD)	**Deponie:** 20 t × 79,30 DM/t = 1586 DM/a **Transport:** 4 × 55 DM/Mulde = 220 DM/a

* Cr_2O_3-haltige Massen werden zukünftig nicht mehr eingesetzt

Tab. 6-2: Abfälle/Reststoffe, deren Zusammensetzung und Entsorgung

Abfälle/Reststoffe – Erläuterungen zu Tabelle 6-2

R 1 **Schlacke (phosphorarm):** Die Schlacke wird mit einem Abschlacker von der Schmelzoberfläche gelöst, abgezogen, aus dem Ofen herausgehoben und in einen schwenkbar aufgehängten Schlackenbehälter geworfen, der unterhalb der Schmelzbühne steht. Ist der Behälter gefüllt, wird die Schlacke in Containern mit 6 m^3 Fassungsvermögen umgefüllt und in diesen zur Deponie transportiert. Die spezifische Schlackenmenge beträgt etwa 49 kg Schlacke (phosphorarm) pro Tonne Schmelzprodukt.

Die verschiedenen Schlacken werden werksintern mit Bezeichnungen versehen. Die phosphorarmen Schlacken werden zusammen entsorgt. Daraus entsteht eine Mischschlacke aus den Schlacken Pl 1, Pl 7, Pl 12, Pl 20, Pl 33. Die Mengenverhältnisse schwanken je nach Art der zu fertigenden Schmelzprodukte (Tabelle 6-3, Tabelle 6-4).

Alle Schlacken enthalten wechselnde Mengen an Eisenoxiden (etwa 5–40 % FeO und Fe_2O_3). Die Schlacken mit der Bezeichnung Pl 106 und 0,7 P fallen in gleichartiger Zusammensetzung an (siehe Tabelle 6-5). Die anderen Schlacken haben unterschiedliche Zusammensetzungen. Ähnliche Schlacken aus niedriglegierten Werkstoffen entstehen aus den Gußproduktsorten Pl 1 und Pl 7. Ebenso entstehen gleichartige Schlacken auch im Werk I mit den Sorten Pl 1, Pl 7, HFG 40. Sinnvoll wäre es, diese beiden Schlackenströme zusammenzufassen und einer gemeinsamen Aufbereitung zuzuführen.

Schlacken ähnlicher Zusammensetzung entstehen ebenfalls bei den hochchromlegierten Werkstoffen wie Pl 12, Pl 20, Pl 33 und evtl. Pl 467. Auch diese Schlackenströme sollten zu einer Schlackenmischung zusammengefaßt werden.

Schlackenmengen		
Werkstoffbezeichnung	**Produktion (guter Guß) t/a**	**Schlacke t/a**
Pl 1*	100 (3 %)	6
Pl 7*	800 (21 %)	39
Pl 12*	1000 (26 %)	}
Pl 12.12*	35 (1 %)	} 50
Pl 20*	50 (1 %)	2
Pl 33*	420 (11 %)	21
Pl 104*	320 (8 %)	15
Pl 106**	1100 (29 %)	54**
Summe	3 825	187

* Mischschlacke phosphorarm, ** phosphorreiche Schlacke

Tab. 6-3: Schlackenmengen aus dem untersuchten Werk III mit ihren dem Schmelzprodukt zugeordneten Bezeichnungen

SCHLACKENANALYSEN IN %						
Werk	**WI + WIII**	**WI**	**WII**	**WIII**	**WIII**	**WI**
Werk-stoffbez.	**PI 106 = 0,7 P**	**HFG 40**	**PI 7**	**PI 12**	**PI 33**	**PI 376**
SiO_2	30–70	50–80	50–80	20–40	50–70	40–70
CaO	0–3	0–3	0–3	0–1	5	1
Al_2O_3	2–12	8–12	5–12	0–2	5	5
Fe ges.				0–70	0–10	13
MnO	1–7	0,5–3	3–7	1–4	5–10	5
S	<0,1	<0,2	<0,2	<0,2	<0,1	<0,1
MgO	<0,05	<0,2	<0,05	<0,05	1	0,2
TiO_2	0,3–1	<1	<0,5	<0,3	0,4	0,6
Cr_2O_3	0,1–0,5	0,1	1–2	10–20	12	14
FeO	5–20	5–30	10–20	–	1,5	
Fe_2O_3	<0,1	<0,1	<0,1	–		
P	<0,3	<0,08	<0,08	<0,08		
P_2O_5					<0,02	0,03
WO_2						6,5
Mo-Oxid						3,7

Anmerkung: Die Schlacke HFG40 ist ähnlich der Schlacke PI 7

Tab. 6-4: Zusammensetzung der einzelnen Schlackenarten aus den verschiedenen Werken des untersuchten Unternehmens

Eine gleichbleibende Schlackenqualität kann erreicht werden, wenn die chrom-oxidhaltigen Schlacken separat gesammelt werden. Gleichbleibende Qualitäten und Inhaltsstoffe sind eine der Grundvoraussetzungen für das Aufbereiten der Schlacken zum Wiederverwenden in anderen externen Produktionsbereichen. In Werk I sind 437 t Schlacken/Jahr in einer ähnlichen Zusammensetzung wie in Werk III zu entsorgen. Bei der Vermeidung oder Verwertung sind alle Schlacken des Unternehmens gemeinsam zu betrachten, um eine wirtschaftliche Entsorgung zu ermöglichen.

Die folgende Tabelle 6-5 gibt zusammengefaßt für die wesentlichen Schlackenparameter nach Eluatauswertungsverfahren DIN 38414-S4 wieder.

Nr.	Parameter	Einheit	PI 7-Schlacke	PI 12-Schlacke	PI 33-Schlacke	0,7%-P-Schlacke	HFG 40-Schlacke	PI 476-Schlacke
1	pH-Wert	ms/m	9,4	7,1	8,1	10,2	10,0	7,2
2	Leitfähigkeit	m mol/l	7,1	1,26	1,9	7,1	5,8	2,6
3	Säure-Basenkapazität bis pH 8,2	m mol/l	0,1	–	–	0,3	0,2	–
4	Säure-Basenkapazität bis pH 4,3	mg/l	0,6	–	0,1	0,5	0,5	–
5	Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB-Wert)	mg/l	<15	<15	<15	<15	<15	<15
6	Cyanid ges.	mg/l	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
7	Phenol-Index nach Destillation	mg/l	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
8	Fluorid	mg/l	0,49	<0,1	0,11	0,55	0,45	0,19
9	Zink	mg/l	0,007	0,009	<0,005	0,010	0,006	<0,008
10	Blei	mg/l	<0,05	<0,05	<0,05	0,053	<0,05	<0,05
11	Cadmium	mg/l	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
12	Arsen	mg/l	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
13	Eisen	mg/l	0,22	0,29	<0,006	<0,13	<0,10	0,58
14	Chrom ges.	mg/l	–	–	0,023	–	–	<0,005
15	Nickel	mg/l	–	–	<0,020	–	–	–
16	Mangan	mg/l	–	–	–	–	–	0,18
17	Magnesium	mg/l	–	–	–	–	–	0,082

Tab. 6-5: Schlackeneluatauswertung nach DIN 38414-S4

Alle Schlackeneluate sind farb- und geruchlos. Untersucht wurden alle Parameter, die für die Beurteilung des Deponieverhaltens von Gießerei-Reststoffen von Bedeutung sind. Laut Aussage des untersuchenden Instituts bestehen die untersuchten Schlacken hauptsächlich aus Silikaten und enthalten keine wasserlöslichen und wassergefährdenden Stoffe, weshalb die Ablagerung auf Bauschuttdeponien ohne Bedenken möglich ist.

R 2 **Schlacke (phosphorreich)** entsteht nur bei einem Schmelzprodukt (Tabelle 6-3). Die Schlacke wird getrennt gehalten, abgedeckt und einige Tage ausreagiert, bis die Geruchsbildung abgeklungen ist. Es entstehen etwa 54 t phosphorreiche Schlacken, die in Zukunft getrennt werden von den phosphorarmen Schlacken.

R 3 **Stäube** fallen in den Filteranlagen der Trocknungsanlage und der Induktionsöfen in einer Gesamtmenge von 44 t/Jahr an. Dies entspricht einer spezifischen Staubmenge von ca. 12 kg Stäube/t Schmelzprodukt. Diese Stäube bestehen im wesentlichen aus Eisenoxiden (ca. 40 %) und metallischen Anteilen (bis 50 %) sowie Legierungsabbrand. Genauere Untersuchungen liegen nicht vor.

R 4 **Tiegelofenausbrüche** entstehen beim Ausbrechen oder Ausschälen und Neuaufbauen der Induktionsofenausmauerungen in den Öfen der

- Stahlgußproduktionslinie für Schleuderguß (wöchentlich),
- Graugußlinie für Schleuderguß (alle 1 bis 3 Monate),
- Graugußlinie für Formerei (alle 2 bis 4 Wochen).

Die Ausbruchmengen betragen für die Induktionsöfen etwa 60 t/a. Die Zusammensetzungen der Ofenausbrüche zeigt die Tabelle 6-7. Die Ausbrüche bestehen vorwiegend aus Quarzid (Siliziumoxiden). In Werk I sind jährlich etwa 200 t Ofenbausbrüche zu entsorgen. Diese haben eine ähnliche Zusammensetzung wie in Werk III. Die Tiegelofenausbrüche werden deponiert.

Stoffart		in Prozent
Siliziumoxid	SiO_2	65–70
Aluminiumoxid	Al_2O_3	2–3
Eisenoxide	Fe	5–6
Eisen (metallisch)	Fe_2O_3	8–9
Chromoxid	Cr_2O_3	ca. 0,8
Kalziumoxid	CaO	ca. 0,8
Magnesiumoxid	MgO	ca. 0,4
Schwefel	S	ca. 0,4
Manganoxid	MnO	ca. 2
Natriumoxid	Na_2O	ca. 0,2

Anmerkung: Dichte beträgt etwa 1,2 t/m^3

Tab. 6-6: Zusammensetzung der Tiegelofenausbrüche (Schätzwerte)

R 5 **Vergießofenausbrüche:** Im Vergießofen entstehen nur noch geringe Schlackenmengen, weil er sauerstoffarm betrieben wird. Die Ofenausmauerung wird etwa einmal pro Jahr für den Vergießofen mit der hochlegierten Schmelze und nur etwa alle 1,5 bis 2 Jahre für die niedriglegierten Schmelzen erneuert. Die Vergießöfen für die Schleudergußlinie werden nur 1- bis 2mal pro Jahr erneuert. Es entstehen ca. 20 t Ausbrüche pro Jahr, die überwiegend aus Korundmassen (Aluminium- und Titanoxiden) bestehen. Diese Ausbrüche werden gemeinsam mit den Tiegelausbrüchen deponiert.

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

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

In der untersuchten Schmelzanlage werden bereits einige Maßnahmen zur Vermeidung und Aufbereitung der Schlacken, Stäube und Ofenausbrüche durchgeführt. Darunter sind Maßnahmen zur Verbesserung und Optimierung der Schmelzbedingungen wie Reinigung der Einsatzstoffe und Abdecken der Schmelzaggregate, die sich auch günstig auf die Vermeidung und Verwertung der Reststoffe auswirken.

7.1 Einsatz von sauberen Einsatzmaterialien

Im untersuchten Betriebsteil werden einige Einsatzstoffe bereits vorbehandelt. Die ölhaltigen Späne aus der eigenen spanenden Bearbeitung müssen vor ihrem Wiedereinschmelzen verfahrensbedingt gereinigt werden, was von einem externen Aufbereiterbetrieb vorgenommen wird. Außerdem wird feuchtes Roheisen, Stahlschrott und Kreislaufmaterial in der Trocknungsanlage entfeuchtet. Die dabei entstehenden Stäube werden in dem Filteranlagenstrang für Grobstäube aus der heißen Abluft abgeschieden. Sandbehaftetes Kreislaufmaterial von den Vergießstellen wird gründlich abgeklopft und abgereinigt. Die Reinigungsmaßnahmen werden zwar aus schmelztechnischen Gründen vorgenommen, tragen jedoch gleichzeitig zur Reduzierung der Schlacken- und Staubmengen aus den Induktionsöfen bei.

7.2 Ofenausbruchtrennung

Die Ofenausbrüche aus Tiegel- und Rinnenofen werden getrennt gesammelt. Dies geschieht aus Gründen der verschiedenen stofflichen Zusammensetzung. Die Rinnenofenausbrüche haben z. T. eine Grünfärbung. Die Annahme der Rinnenofenausbrüche wird deshalb auf die Hausmülldeponie in der letzten Zeit versagt, weil Schwermetallgehalte, vor allem Chrom, vermutet werden. Die Rinnenofenausbrüche werden deshalb auf dem Betriebsgelände zwischengelagert. Geplant ist der Einsatz einer chromfreien Zustellung bei den Rinnenöfen.

7.3 Getrennthaltung der Grob- und Feinstäube

Die Entstaubungsanlage hat zwei Kreisläufe. Einen für Grobstäube, die an den Chargierstellen und der Trocknungsanlage abgesaugt werden, und einen für Feinstäube, die über Randabsaugungen an den Schmelzöfen und Vergießöfen und an den Übergabestellen abgesaugt werden. Die Grob- und Feinstäube gelangen nach ihrer Abreinigung aus der Abluft in Big Bags, in denen sie derzeit noch getrennt auf der Hausmülldeponie entsorgt werden. Auch hier liegen durch die Getrennthaltung der Stäube bereits Voraussetzungen zur Aufbereitung und Verwertung vor.

7.4 Oxidierende Einsatzstoffe abdecken

Durch das Abdecken der oxidierenden Einsatzstoffe wie Chrom verringert sich der Reststoffanfall (vgl. Kapitel 4.1).

7.5 Schmelzöfen geschlossen fahren

Die Ofendeckel werden nur beim Befüllen, Nachlegieren, Abschlacken und Entleeren geöffnet. Undichte Stellen und Lecks an den Ofendeckeln werden abgedichtet. Bei den geschlossenen Induktionsrinnenöfen zum Warmhalten und Vergießen wird eine Ofenatmosphäre mit Stickstoff hergestellt, wodurch die Oxidation des Schmelzgutes stark verringert wird. Durch diese Maßnahmen wird der Futterverschleiß verringert und der Anfall von Schlacken und Stäuben vermieden (vgl. Kapitel 4.1).

7.6 Optimierte Fahrweise mit geringer Überhitzung

Durch Optimierung der Zugabe von Einsatzmaterialien und der zeitgerechten Abnahme des Schmelzgutes aus dem Schmelzofen werden die Zeiten, in denen das Material überhitzt werden muß, auf ein Minimum beschränkt, wodurch weitere Reststoffmengen vermieden werden (vgl. Kapitel 4.1).

7.7 Widerstandsfähige Ausmauerungen und Tiegel

Zur Verringerung der Ofenausbrüche werden anstelle einer Ofenausmauerungserneuerung oder -neuzustellung die Ofenwände nur abgeschält. Die ausgewaschenen Löcher im Ofen werden mit geeigneten Materialien geflickt.

Die Tiegelöfen werden vorwiegend mit Quarzmassen ausgekleidet, deren Haltbarkeit nicht sehr hoch ist. Der Betrieb hat Versuche gefahren, eine zwar länger haltende und teurere Magnesitauskleidung einzusetzen. Dies erwies sich jedoch als problematisch, da sie nicht temperaturwechselbeständig ist. Mit dem Erkalten können Spannungsrisse auftreten. Das Ausbrechen von Magnesit ist mit erheblichem Mehraufwand verbunden. Deshalb wird weiterhin bei der Erneuerung der Tiegelofenausmauerungen vorwiegend Quarzmasse eingesetzt.

8 Konzepte zur Vermeidung und Verwertung weiterer Abfälle/Reststoffe

8.1 Vermeidung durch Umstellung von Netzfrequenz- auf Mittelfrequenzschmelzöfen

Die Schmelzanlage wird 3schichtig betrieben, obwohl die Verarbeitung bzw. das Vergießen der Flüssigeisen nur in 2 Schichten erfolgt. Dies liegt an der langwierigen Anfahrtechnik dieser Ofenart mit Anfahrblock und Sumpfbetrieb. Deshalb werden diese Öfen nur am Wochenende entleert und abgestellt (vgl. Kapitel 4.1).

Beim Einsatz von Mittelfrequenzöfen könnte die Anlage nachts außer Betrieb genommen werden. Dadurch entfällt das Warmhalten des Flüssigeisens in den Öfen. Außerdem werden erhebliche Strom- sowie Personalkosten durch Entfallen einer Schicht eingespart.

Die Reststoffbilanz wird sich für alle Reststoffe günstig auswirken, weil prozeßbedingt ein großer Teil des Abbrandes und der Oxidation in dem Flüssigeisen vermieden wird.

8.2 Verbesserte Abschlacktechniken

Die Abschlacktechnik ist zu verbessern. Dadurch sollen weniger Flüssigeisenanteile mit den Schlacken ausgeschleust werden, wodurch die Schlackenmenge verringert und die homogenen Schlacken leichter aufzubereiten und zu verwerten sind.

8.3 Zusammenführen der Schlacken und Stäube aus verschiedenen Gießereibetrieben

Die Schlackenmengen aus der untersuchten Schmelzanlage sind vergleichsweise gering. Die Bereitstellung von eigenen Aufbereitungstechnologien sowie die Vermarktung dieser Mengen ist für den Betrieb aller Voraussicht nach wirtschaftlich nicht vertretbar. Aus diesem Grunde bietet sich die gemeinsame Verwertung von ähnlichen Schlacken mit denen aus anderen Gießereibetrieben an. Die Aufbereitung und der Absatz von Schlacken und Stäuben mit garantiert gleichbleibender Qualität in großen Mengen haben eine realistische Verwertungschance.

8.4 Eindüsen der Stäube in Kupolöfen

Die Wiedereindüsung von z. B. zinkhaltigen Stäuben in Kupolöfen wird bereits praktiziert. Ziel dieser Verfahren ist die Aufkonzentration des wiederverwendbaren Zinks in den Stäuben. Bei einem Zinkgehalt von über 16 % werden die Stäube von Aufbereitungsbetrieben angenommen und das Zink wirtschaftlich wiedergewonnen und an die zinkverarbeitende Industrie verkauft.

Diese Technik ließe sich möglicherweise auf Stäube aus Induktionsofenanlagen übertragen. Gemeinsam mit Kupolofenbetreibern könnten Versuche durchgeführt werden, um den Einfluß der Stäube auf den Kupolofenbetrieb zu testen.

8.5 Wiedereinschmelzen der Stäube in Hüttenwerken

Je nach Eisengehalt der Stäube ist die Wiedereinschmelzung in Hüttenwerken möglich. Nach Aussagen des untersuchten Betriebes enthalten die Stäube bis zu 40 % Eisenoxide und bis zu 50 % metallische Eisenanteile, wodurch sich die Aufbereitung anbietet. Deshalb sollte die Verwertung der Stäube in Hüttenwerken angestrebt und die Randbedingungen zur Abgabe geklärt werden (siehe Abschnitt 4.2.2).

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 maßgebend. 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 Beseitigung. 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. Aus 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 und 50 DM/t und für Sonderabfälle zwischen 30 und 120 DM/t.

Die Entsorgungskosten für den untersuchten Betrieb zeigt die folgende Tabelle.

Abfallart	Mengen t/a	Deponie-kosten DM/t	Transport-kosten DM/t	Entsorgungs-kosten (ge-samt) DM/a
R1 Schlacke (phosphorarm)	133	55,10	11,60	8 871
R2 Schlacke (phosphorreich)	54	55,10	11,50	3 596
R3 Stäube	44	79,30	10,20	3 938
R4 Tiegelofenausbrüche	60	79,30	7,90	5 232
R5 Vergießofenausbrüche	20	79,30	11,00	1 806
R6 Gewerbeabfälle	6	40,00	9,50	297
GESAMTKOSTEN DER ENTSORGUNG				**23 740**

Tab. 9-2: Entsorgungskosten durch Deponierung und Transport aller Abfälle/Reststoffe für den untersuchten Betrieb (1989)

Bezogen auf 3 870 t (1989) Gußeisen und Betriebskosten von 1 782 714 DM/a und Einsatzstoffkosten von 1 552 112 DM/a ergeben sich für den Betrieb spezifische Entsorgungskosten von 6,2 DM/t erzeugtem gutem Guß. Bei Produktkosten von 862 DM/t beträgt der Anteil der Entsorgungskosten etwa 0,7 %.

Literaturverzeichnis

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

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

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

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

Gesamtverband Deutscher Metallgießereien (GDM)
Geschäftsbericht
Düsseldorf 1989

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

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

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

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 1990

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.

1-1 Möglichkeiten der Vermeidung und Verwertung in einer Induktionsofen-Schmelzanlage 11
2-1 Einteilung und Übersicht der wichtigsten Schmelzprodukte in Gießereibetrieben 13
2-2 Aufbau eines Induktionstiegelofens 16
2-3 Aufbau einer Gesamtanlage bzw. Aufstellungsplan für Mittelfrequenz-Tiegelöfen 17
2-4 Minimale Schmelzzeit (ohne Nebenzeiten) für das Aufschmelzen von Stahl bei einem bis zu 25 % über Spulenoberkante gefüllten Tiegel, abhängig von Frequenz und mittlerer Leistung zu maximaler Leistung δ 18
2-5 Netzfrequenz-Induktionsrinnenofen mit geschlossener Rinnenführung 18
2-6 Technologische Grenzen des Induktionstiegelofens 19
2-7 Leistung von Netz- und Mittelfrequenzöfen in Verbindung mit der Badbewegung und dem Tiegelinhalt 20
2-8 Beispiel einer Gießerei mit Induktionsöfen 25
5-1 Gebäudegrundriß des untersuchten Betriebes und Anordnung der Arbeitsbereiche 43
5-2 Schematischer Ablauf der Arbeiten in der Induktionsschmelzanlage 46
5-3 Wöchentliches Abfahren, Ausbrechen, Neuaufbau und Anfahren eines Induktionstiegelofens 49
6-1 Schematischer Überblick über die Stoffströme 51
6-2 Mengenfließbild der Induktionsofenschmelzanlage mit spezifischen Mengenangaben, bezogen auf 1 t Gußeisenprodukte 52

Tabellenverzeichnis

Tab.

0-1 Charakteristische Parameter der in Induktionsschmelzanlagen bevorzugt eingesetzten Ofenbauarten 7
0-2 Übersicht zur Vermeidung, Behandlungsmaßnahmen und Verwertungsmöglichkeiten für Abfälle/Reststoffe aus Induktionsofenschmelzbetrieben . . . 9
2-1 Einsatz-, Nutz- und Verlustenergien für das Schmelzen von Gußeisen im Netzfrequenz-Induktionstiegelofen 21
2-2 Komponenten einer Induktionsofen-Schmelzanlage 24
2-3 Einteilung der feuerfesten Baustoffe (Zustellungen) 27
2-4 Feuerfeste Stoffe zur Auskleidung von Induktionsöfen 28
3-1 Zusammensetzung von Induktionsofenschlacken beim Schmelzen von unlegiertem und niedriglegiertem Gußeisen (GGL, GGG) 30
3-2 Zusammensetzung von Stäuben aus Induktionstiegelöfen beim Schmelzen von Kugelgraphitguß 32
3-3 Geschätzte Staubzusammensetzung aus der Hallenentstaubung einer Induktionsofenschmelzanlage 32
3-4 Zusammensetzungen von Netzfrequenztiegelofenausbrüchen 33
3-5 Zusammensetzungen von Induktionsrinnenofenausbrüchen 33
4-1 Übersicht zur Vermeidung, Behandlungsmaßnahmen und Verwertungsmöglichkeiten für Abfälle/Reststoffe aus Induktionsofenschmelzbetrieben . . . 35
5-1 Maschinelle und apparative Ausstattung 44
5-2 Schmelzprogramm und Schmelzleistungen der einzelnen Produktionslinien . . 48
6-1 Einsatzstoffe und deren Verbleib 53

6-2 Abfälle/Reststoffe, deren Zusammensetzung und Entsorgung 58
6-3 Schlackenmengen aus dem untersuchten Werk III mit ihren dem Schmelzprodukt zugeordneten Bezeichnungen 59
6-4 Zusammensetzung der einzelnen Schlackenarten aus den verschiedenen Werken des untersuchten Unternehmens 60
6-5 Schlackeneluatauswertung nach DIN 38414-S4 61
6-6 Zusammensetzung der Tiegelofenausbrüche (Schätzwerte) 62
9-1 Durchschnittliche Entsorgungskosten (1993) 68
9-2 Entsorgungskosten durch Deponierung und Transport aller Abfälle/Reststoffe für den untersuchten Betrieb (1989) 68