
Effiziente Energieverwendung in der Industrie – Teilprojekt „Metallschmelzbetriebe“

Effiziente Energienutzung in Nicht-Eisen-Metall-
Schmelzbetrieben

Augsburg, 2005

Herausgeber: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160, 86179 Augsburg
Tel.: (0821) 90 71 - 0
Fax: (0821) 90 71 - 55 56
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: <http://www.bayern.de/lfu>

Verfasser: Prof. Dr.-Ing. Wolfram Stephan, FH Nürnberg - ieg
Dipl.-Ing. (FH) Kai Zitzmann, FH Nürnberg - ieg
Prof. Dr. Günther Pröbstle, FH Ansbach
Prof. Dr.-Ing. Jörg Kapischke, FH Ansbach

im Auftrag des
Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz, LfU

Zitiervorschlag:
Bayer. Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.)
Effiziente Energieverwendung in der Industrie – Teilprojekt „Metallschmelzbetriebe“
Effiziente Energienutzung in Nicht-Eisen-Metall-Schmelzbetriebe, Augsburg, 2005

Das Bayerische Landesamt für Umweltschutz (LfU) gehört zum Geschäftsbereich des
Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUGV).

© Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Augsburg, 2005

Gedruckt auf Recyclingpapier

Inhaltsverzeichnis

1	Glossar	3
2	Aufgabenstellung	6
2.1	Ausgangslage	6
2.2	Arbeitsumfang	6
2.3	Beteiligte Firmen und Projektpartner	7
3	Ausgangssituation in den untersuchten Betrieben	9
3.1	Betrieb A	9
3.2	Betrieb B	12
3.3	Betrieb C	14
3.4	Betrieb D	16
4	Gas-/Ölbefeuerte Schmelz- und Warmhalteöfen	19
4.1	Energiebilanz und Wirkungsgrade	20
4.2	Teillastverhalten von Schmelzöfen	21
4.3	Ofenbauarten und Kennwerte	22
4.4	Tiegelöfen	23
4.5	Schachtschmelzöfen	26
4.6	Herd- und Wannenöfen	29
4.7	Zwei-Kammeröfen	30
4.8	Drehtrommelöfen	31
4.9	Brenner für öl-/gasbeheizte Öfen	32
4.10	Ofenauskleidung und Wärmedämmung	39
4.11	Schmelzverluste	41
5	Elektrische beheizte Tiegel und Rinnenöfen	42
5.1	Elektrisch widerstandsbeheizte Tiegelöfen	43
5.2	Prinzip induktiver Elektroschmelzverfahren	45
5.3	Schmelzen von Spänen	50
5.4	Absauganlagen beim Späneschmelzen	52
5.5	Vergleichszahlen zum Energieeinsatz in Elektroschmelzöfen	52
5.6	Staubemissionen und Absaugsysteme	53
5.7	Technologische Weiterentwicklungen zur Reduzierung des Energieverbrauchs bei Elektroschmelzverfahren	53
5.8	Energielastmanagement in Elektrogießereien	55

6	Einsparmöglichkeiten im Schmelzbetrieb	56
6.1	Tiegelöfen	56
6.2	Schachtschmelzöfen	63
6.3	Energieeinsparung durch Anlieferung von Flüssigmetall.....	66
6.4	Elektrisch beheizte Schmelz- und Warmhalteöfen (Betrieb A)	72
6.5	Energetische Untersuchungen zur Bolzenerwärmung vor dem Warmumformen.....	76
7	Wärmeauskopplung und Abwärmenutzung.....	79
7.1	Abwärmeströme an Schmelz- und Warmhalteöfen	79
7.2	Abwärmenutzung.....	80
7.3	Praxisbeispiel 1: Abwärmepotenzial und Nutzung im Betrieb C	82
7.4	Praxisbeispiel 2: Wirtschaftlichkeit der Abwärmenutzung an Schachtschmelzöfen	86
7.5	Praxisbeispiel 3: Abwärmenutzung bei Elektroschmelzöfen	90
7.6	Sonderthema: Nutzung des Energieinhalts im Gussteil (Bolzen).....	92
8	Checkliste effiziente Energieverwendung in NE-Metall-Schmelzbetriebe	95
8.1	Hinweise für Gießereien mit brennstoffbeheizten Schmelzöfen	95
8.2	Allg. Handlungsempfehlungen für Gießereien mit Induktionsschmelzaggregaten	97
9	Hinweise auf energetische Optimierungsmöglichkeiten bei Querschnittstechnologien	99
9.1	Druckluft.....	99
9.2	Entstaubung	99
9.3	Hydraulik.....	99
9.4	Beleuchtung.....	99
9.5	Maschinen, Motoren	100
9.6	Pumpen.....	100
9.7	Lüftung, Klima	100
9.8	Kühlung.....	100
9.9	Energiemanagement.....	100
10	Übersicht Einsparmaßnahmen	101
10.1	Zusammenfassung der Einsparpotenziale in Schmelzbetrieben mit brennstoffbeheizten Öfen	101
10.2	Flüssigmetallanlieferung	104
10.3	Zusammenfassung der Einsparpotenziale in einem Elektroschmelzbetrieb	105
10.4	Abwärmenutzung anhand von Praxisbeispielen	106
11	Literaturverzeichnis.....	107

1 Glossar

Abbrand

Beim Einschmelzen aluminiumhaltiger Vorstoffe auftretende Metallverluste durch Oxidation (vgl. Krätze).

Abwärme

Abwärme ist der bei der Kraft- oder Wärmeerzeugung oder bei chemischen Prozessen anfallende Anteil an Wärmeenergie, der ungenutzt in die Umwelt entweicht.

Aufschmelzbetrieb

Als Schmelzen bezeichnet man das Aufschmelzen von festem Material in Schmelzöfen, infolge von Temperaturerhöhung.

Barren

siehe Masseln

Beschickungsvorgang

Befüllen oder Versorgen einer technischen Anlage mit z.B. Masseln.

Blockmetall

Aluminiumgusslegierungen in Form von (vgl.) Masseln.

Bolzen

zylindrischer Metallkörper

Charge

Die für einen diskontinuierlich arbeitenden Ofen in Form von Block- oder Umlaufmaterial hergestellte Metallmenge.

Drehtrommelofen

Rotierender liegender Trommelofen, üblicherweise mit Öl- oder Gasbrenner an der Stirnseite, Abgasabzug auf der entgegengesetzten Seite; Schmelzaggregat für verunreinigte Aluminiumschrotte unter Verwendung von Schmelzsalz.

Elektrolyse

Unter Elektrolyse versteht man die Umsetzung eines Stoffes durch elektrischen Strom. Es handelt sich dabei um eine erzwungene Reaktion im Gegensatz zu den freiwillig ablaufenden Reaktionen in galvanischen Elementen.

Endenergie

Direkter prozessbedingter Energieeinsatz ohne Berücksichtigung der energetischen Aufwendungen der Energiebereitstellung.

Emission

Im Sinne der TA Luft, die von einer Anlage ausgehenden Luftverunreinigungen; im weiteren Sinne auch Lärm, Abwärme, Geruch, Wasserverunreinigungen etc.

Formguss

Gießen von Metallen oder Legierungen in Formen, wobei die Werkstücke nahezu ihre endgültige Gestalt erhalten.

Gegenstrom

Die Materieströme werden in entgegengesetzten Richtungen aneinander vorbeigeführt.

Gießigenschaften

Eigenschaften von Gusslegierungen wie Formfüllungsvermögen, Fließverhalten, Warmrissneigung, Speisungsvermögen etc., deren Optimierung die Bedingung zur Erzeugung von einwandfreiem (vlg.) Formguss ist.

Gusslegierungen

Aluminiumlegierungen zur Herstellung von Formgussteilen, deren Hauptlegierungselemente Silizium, Kupfer und Magnesium sind. Sie zeichnen sich durch gute (vgl.) Gieß Eigenschaften aus und werden überwiegend aus sekundären Aluminiumvorstoffen hergestellt.

Halbzeuge

Als Halbzeuge bezeichnet man in der Fertigung solche bereits vor- oder zubereiteten Rohmaterialien, die in größeren Abmaßen vorliegen, insbesondere also Bleche, Stangen, Hohlstäbe, Profile etc. Dabei wird ein Halbzeug in der Regel so ausgewählt, dass eine Dimension (beispielsweise der Durchmesser oder die Dicke) bereits der entsprechenden Dimension des herzustellenden Produktes bestmöglich entspricht.

Konvektion

Durch Temperatur- und/oder Dichteunterschiede entstehende oder zwangsweise verursachte Bewegung von Flüssigkeiten und Gasen (freie Konvektion und Zwangskonvektion).

Konverter

veraltete Bezeichnung für (vgl.) Warmhalteofen.

Krätze

Oxidationsprodukt des flüssigen Aluminiums, das beim Schmelzen, Raffinieren und Vergießen anfällt, von der Schmelzoberfläche „abgekratzt“ wird und neben Aluminiumoxid Oxide von Legierungselemente, insbesondere metallisches Aluminium sowie ggf. aus der Schmelzbehandlung stammende Chloride und Fluoride enthält.

Legierungsmetall

Metalle, die einer Aluminiumschmelze in reiner Form, als Vorlegierung oder in Form entsprechend legierter Schrotte zugesetzt werden.

Massel

kleine, auf kontinuierlich arbeitenden Kokillenbändern, Karussell- oder horizontalen Stranggussanlagen gegossene, stapelbare Metallblöcke mit einem Gewicht von 7 bis 25 kg, die zum wieder Einschmelzen in Gießereien vorgesehen sind.

Oxidation

Oxidation im engeren und ursprünglichen Sinne ist die chemische Reaktion eines Stoffes mit Sauerstoff (Oxygenium). Das dabei entstehende Produkt heißt Oxid.

Primärenergie

für bestimmte Prozesse eingesetzte Energiemenge mit Berücksichtigung der energetischen Aufwendungen und Verluste der Energiebereitstellung.

Querschnittstechnologien

den eigentlichen Prozess begleitende oder unterstützende Technologien.

Raffinieren

Der Legierungsproduktion im Drehtrommelofen ist eine Raffinationsstufe nachgeschaltet. Die erschmolzene Legierung wird hierzu in einen Warmhalteofen (Konverter) geleitet und dort durch den Zusatz von Raffinationsmitteln gereinigt.

Regenerator

Wärmerückgewinnungsanlage, in der ein Speichermedium erwärmt und wiederabgekühlt (regeneriert) wird.

Rekuperator

Mantelrohr-Wärmetauscher zur Verbrennungsluftvorwärmung und Abkühlung der Abgase. Der Wärmetausch findet über die Trennflächen statt.

Rücklaufmaterial

Teil des Gussstücks, das vom Rohling abgetrennt und dem Schmelzprozess wiederzugeführt wird.

Salzschlacke

Metallisches Aluminium, Aluminiumoxid, Oxide der Legierungsmetalle und andere Verunreinigungen enthaltendes Restsalz, das im geschmolzenen Zustand beim Drehtrommelofen-Prozess anfällt und verwertet wird.

Schamottstein

Hitzebeständige Steine zur Auskleidung von Öfen mit hoher Wärmespeicherfähigkeit.

Schmelzwerk, Sekundärhütte

Unternehmen (Refiner), das aus (vgl.) Alt- und Neuschrotten (vgl.) Gusslegierungen (und Desoxidationsaluminium) herstellt und in Form von (vgl.) Masseln und Flüssigaluminium ausliefert.

Sekundäraluminium

das aus sekundären Vorstoffen, d.h. Alt- und/oder Neuschrotten, Spänen und Krätze, hergestellte Aluminium.

Spezifische Schmelzenergie

die spezifische Schmelzenergie ist jene Wärmemenge, die notwendig ist, um eine Tonne eines Stoffes zu schmelzen und auf eine Solltemperatur zu erwärmen.

Strangguss

Herstellung von Press- und Walzbarren durch Gießen in eine formgebende, wassergekühlte Kokille, aus der die Barren kontinuierlich oder halbkontinuierlich vertikal oder horizontal abgezogen werden; auch horizontal zur Herstellung von Gusslegierungsmasseln.

Sumpf

im unteren Teil des Ofens/Tiegels befindliches flüssiges Restmaterial.

Warmhaltebetrieb

Betriebsart von Öfen zum Halten einer vorgegebenen Schmelzbadtemperatur.

Wirkungsgrad, Nutzungsgrad

Verhältnis von Nutzen zu Aufwand.

Zustellung

Auskleidung eines (vgl.) Schmelz- oder Warmhalteofens mit feuerfestem Material, bestehend aus dem Dauerfutter und dem Schmelze- und Schlackenangriff ausgesetzten Verschleißfutter.

2 Aufgabenstellung

Im Rahmen des „Umweltpaktes Bayern“ soll der Umweltschutz auf der Basis von Freiwilligkeit, Eigenverantwortlichkeit und Kooperationsbereitschaft gestärkt werden. Daher haben sich Wirtschaft und Staat gegenseitig verständigt Energie einzusparen und CO₂ zu reduzieren.

Es werden Unternehmen, die energieintensive Prozesse unterhalten oder eben solche Produkte herstellen, ausfindig gemacht. Für diese werden Energiesparpotenziale praxisnah dargestellt und Vorschläge zu deren Umsetzung ausgearbeitet.

Die Ergebnisse dieser betrieblich orientierten Studien werden der Öffentlichkeit in Leitfäden zusammengefasst und zugänglich gemacht.

2.1 Ausgangslage

In der Region Mittelfranken betreiben weit über 30 Firmen Schmelzöfen für NE- und Buntmetalle. Sie ist damit führend im Geschäftsfeld der Nicht-Eisen-Metalle in Bayern. Hinzu kommen Unternehmen als Zulieferer, Industriepartner und Dienstleister, die direkt oder indirekt mit der Branche verbunden sind.

In Gießereien, Ziehereien, Kaltwalzwerke und NE-Metallerzeugung waren im Jahr 2002 6.298 Personen beschäftigt (Betriebe größer 20 Beschäftigte). Dies ist ein Anteil von 5,5 % im Bereich Metall- und Elektroindustrie. Quelle: VBM

Die Nicht-Eisen-Metall-Schmelzbetriebe gehören zu den energieintensivsten Industriebetrieben.

In diesem Zusammenhang wurden in der Region Mittelfranken vier NE-Metall-Schmelzbetrieben gewonnen, um im Rahmen des Projektes „Effiziente Energieverwendung in der Industrie“ des Landesamtes für Umweltschutz Bayern (LfU) mitzuarbeiten.

Für diese Betriebe wurden die CO₂-Minderungspotenziale untersucht und praxisnahe Verbesserungsvorschläge für den Energieeinsatz erarbeitet.

2.2 Arbeitsumfang

Im Rahmen der Praxisstudien für den Leitfaden ergaben sich folgende Arbeitspakete:

Material- und Energieflüsse

Startpunkt des Projektes ist eine TOP-DOWN-Analyse der Material- und Energieflüsse in den untersuchten Betrieben (siehe Kapitel 3). Der Schmelzbetrieb, mit seinen energetischen Optimierungspunkten ist dabei in den Mittelpunkt der Untersuchung gestellt worden. In der weiteren Bearbeitung wird daher der Schwerpunkt auf die Analyse des Schmelzprozesses und deren Komponenten gelegt.

Stand der Technik und Wissenschaft

Alle wesentlichen Komponenten und Prozesse werden basierend auf dem Stand der Technik und der Wissenschaft dargestellt. Auf dieser Basis sind weiterführende betriebliche Analysen durchgeführt (siehe Kapitel 6) worden. Eine ausführliche Literaturrecherche ist erfolgt.

Schmelz- und Warmhalteöfen und Brennertechnik

Kern der Untersuchung sind brennstoff- und elektrischbetriebene Öfen. Bei den mit Brennstoff betriebenen Öfen bestimmen die Brenner wesentlich die energetische Güte. Diese werden daher ausführlich behandelt. Tabelle 2-1 gibt einen Überblick zu den untersuchten Technologien.

Tabelle 2-1: Untersuchte Schmelz- und Warmhalteöfen

Schmelz- und Warmhalteöfen		
Öl/Gas-betriebene Öfen	Elektrisch betriebene Öfen	Brenner
Tiegelöfen	Induktions-Tiegelöfen	Rekuperationsbrenner
Herd- und Wannenöfen	Induktions-Rinnenöfen	Regeneratorbrenner
Schachtschmelzöfen	Widerstandsbeheizte Öfen	Oxi-Brenner
Drehtrommelöfen		Low-NOx-Brenner
Kammeröfen		
Konstruktion		
Abdeckung		
Dämmung		
Auskleidung feuerfest		

Flüssigmetallanlieferung

Die Flüssigmetallanlieferung direkt aus einer Sekundärhütte ist eine energie- und kostengünstige Alternative zum Eigenschmelzen. Dieser Prozess wird daher untersucht und bewertet (siehe Kapitel 6.3).

Abwärmenutzung

Die Abwärmenutzung wird für die Bereiche Abgaswärme, Wärmeinhalt der Abluft von Absaugungen und Wärmeinhalt der Gussstücke behandelt und in Praxisbeispielen dokumentiert (siehe Kapitel 7).

2.3 Beteiligte Firmen und Projektpartner

In das Projekt sind folgende Partner einbezogen:

Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU), Bürgermeister-Ulrich-Str. 160
86179 Augsburg
Ansprechpartner: RD Dr. Gerold Hensler

Regierung von Mittelfranken, Promenade 27 (Schloss), 91522 Ansbach
Ansprechpartner: Ltd. RD Dipl.-Ing. Reiner Seidel

Landratsamt Nürnberger Land, Waldluststr. 1, 91207 Lauf a.d.P.
Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Georg Hofrichter

Institut für Energie und Gebäude – ieg, Georg-Simon-Ohm-Fachhochschule Nürnberg
Keßlerplatz 12, 90489 Nürnberg
Ansprechpartner: Prof. Dr.-Ing. Wolfram Stephan, Dipl.-Ing. (FH) Kai Zitzmann

Fachhochschule Ansbach, Residenzstr. 8, 91522 Ansbach
Ansprechpartner: Prof. Dr.-Ing. Jörg Kapischke, Prof. Dr. Günther Pröbstle

Fa. DIEHL Metall, Heinrich-Diehl-Straße 9, 90552 Röthenbach an der Pegnitz
Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Hans Bondkowski, Dr.-Ing. Claus Heubeck

Fa. FEDERAL-MOGUL Nürnberg GmbH, Nopitschstraße 67, 90441 Nürnberg
Ansprechpartner: Dr. Wolfgang Henning

Fa. HONSEL GUSS GmbH, Nopitschstraße 71, 90441 Nürnberg
Ansprechpartner: Dr.-Ing. Klaus Geissler

Fa. SCHULTE & SCHMIDT Leichtmetallgießerei GmbH & Co KG
Nopitschstr. 46, 90441 Nürnberg
Ansprechpartner: Rainer Feldner, Dipl.-Geologin Anke Bogatsch

Das Projekt wäre ohne die offene und kooperative Zusammenarbeit aller Projektpartner nicht möglich gewesen. Dank gilt auch den Herstellerfirmen und den Lieferanten, die mit ihren Erfahrungen und Kenntnissen zum Gelingen dieses Leitfadens beigetragen haben.

3 Ausgangssituation in den untersuchten Betrieben

Für alle vier Betriebe wird die Ausgangssituation durch eine Analyse der Betriebsstrukturen sowie der Energie- und Materialflüsse erfasst. Für den Schmelzprozess werden Energiekennzahlen ermittelt und erste Optimierungspotenziale identifiziert.

3.1 Betrieb A

Betrieb A ist ein weltweit tätiger Hersteller von Messinghalbzeugen. Diese Produkte werden überwiegend an die weiterverarbeitende Industrie geliefert. Im Werk selbst werden Synchronringe für den KFZ-Getriebebau gefertigt. Die wesentlichen Produktionsbereiche sind die Gießerei, das Presswerk, das Rohrwerk, die Gesenkschmiede mit Pressteilbearbeitung und der Werkzeugbau.

3.1.1 Der Energieeinsatz

Die betriebsinterne leitungsgebundene Energieversorgung besteht aus einem Nahwärmesystem, einem elektrischen 20 kV/400-V Netz und einem unter 3 bar stehenden Gasnetz. Zu den energierelevanten Nebeneinrichtungen zählen u.a. das Entstaubungssystem, das Druckluftsystem und die Beleuchtungseinrichtungen.

Die Hauptenergieströme (2001) sind in Abbildung 3-1 als Flussdiagramm dargestellt.

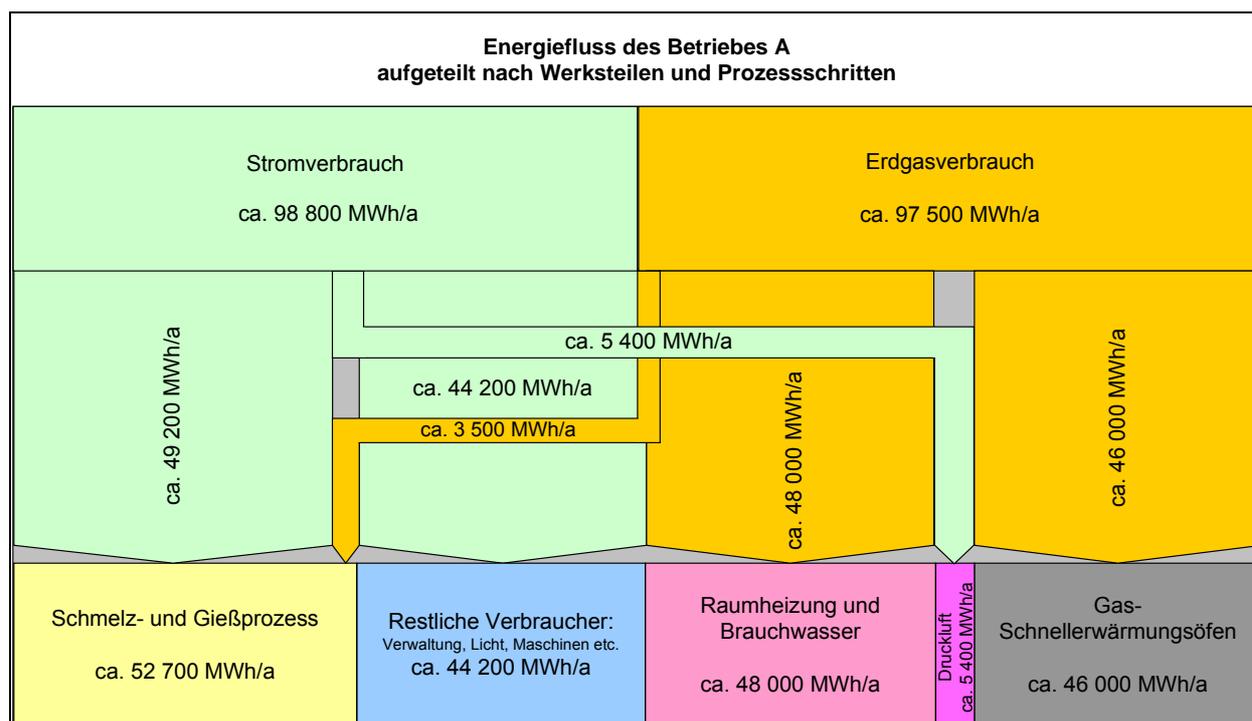


Abbildung 3-1: Energieflussdiagramm für den Betrieb A, aufgeteilt nach Werksteilen und Prozessschritten

3.1.2 Verbrauchsprofile für Strom und Gas

Im Folgenden sind die Verbrauchsprofile für Strom und Gas dargestellt.

Der Stromverbrauch

Die größten Einzelverbraucher für elektrischen Strom sind die 4 Stranggießanlagen. Die Druckluftanlagen benötigen ca. 5 %, die übrigen Hilfs- und Nebensysteme ca. 45 % am Stromanteil.

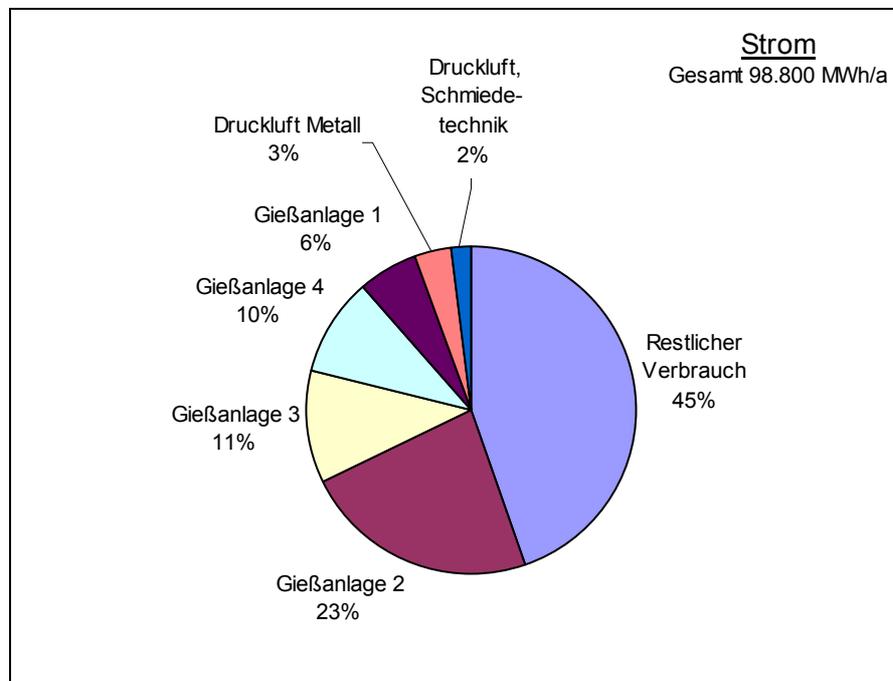


Abbildung 3-2: Zuordnung des Stromverbrauchs zu den Hauptverbrauchern

Der Gasverbrauch

Beim Gasverbrauch dominiert das Kesselhaus (Heizung und Prozesswärme) vor der Prozesswärmebereitstellung mittels Gaserwärmungsöfen in der Weiterverarbeitung.

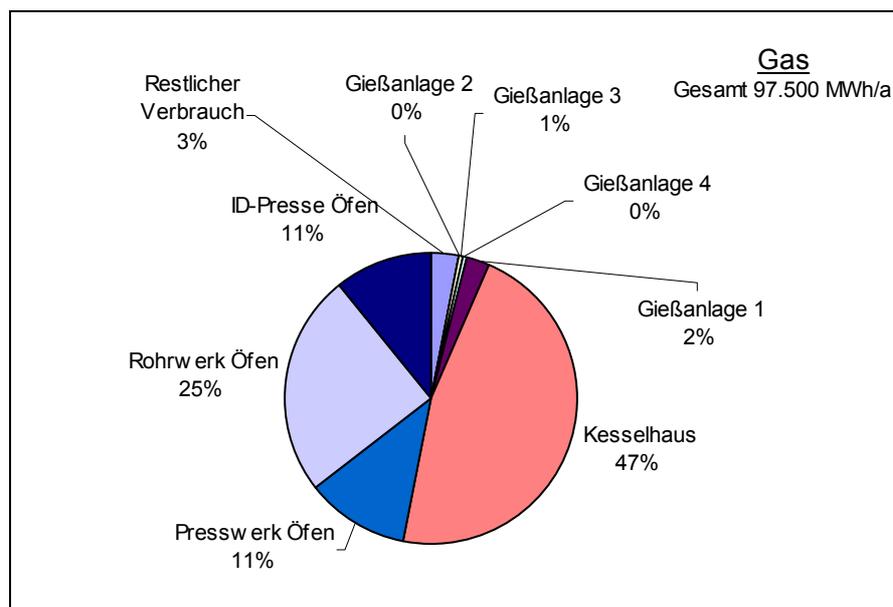


Abbildung 3-3: Zuordnung des Gasverbrauchs zu den Hauptverbrauchern

3.1.3 Material- und Energieflüsse

Der Betrieb schmilzt im Jahr ca. 150 000 t Messing auf, davon entstammen etwa 2/3 extern bezogenen Rohstoffen (überwiegend Recycling) und 1/3 dem betriebsinternen Kreislaufmaterial. Die wesentlichen Bearbeitungsschritte und der zugeordnete Energieeinsatz sind in Abbildung 3-4 nachfolgend skizziert:

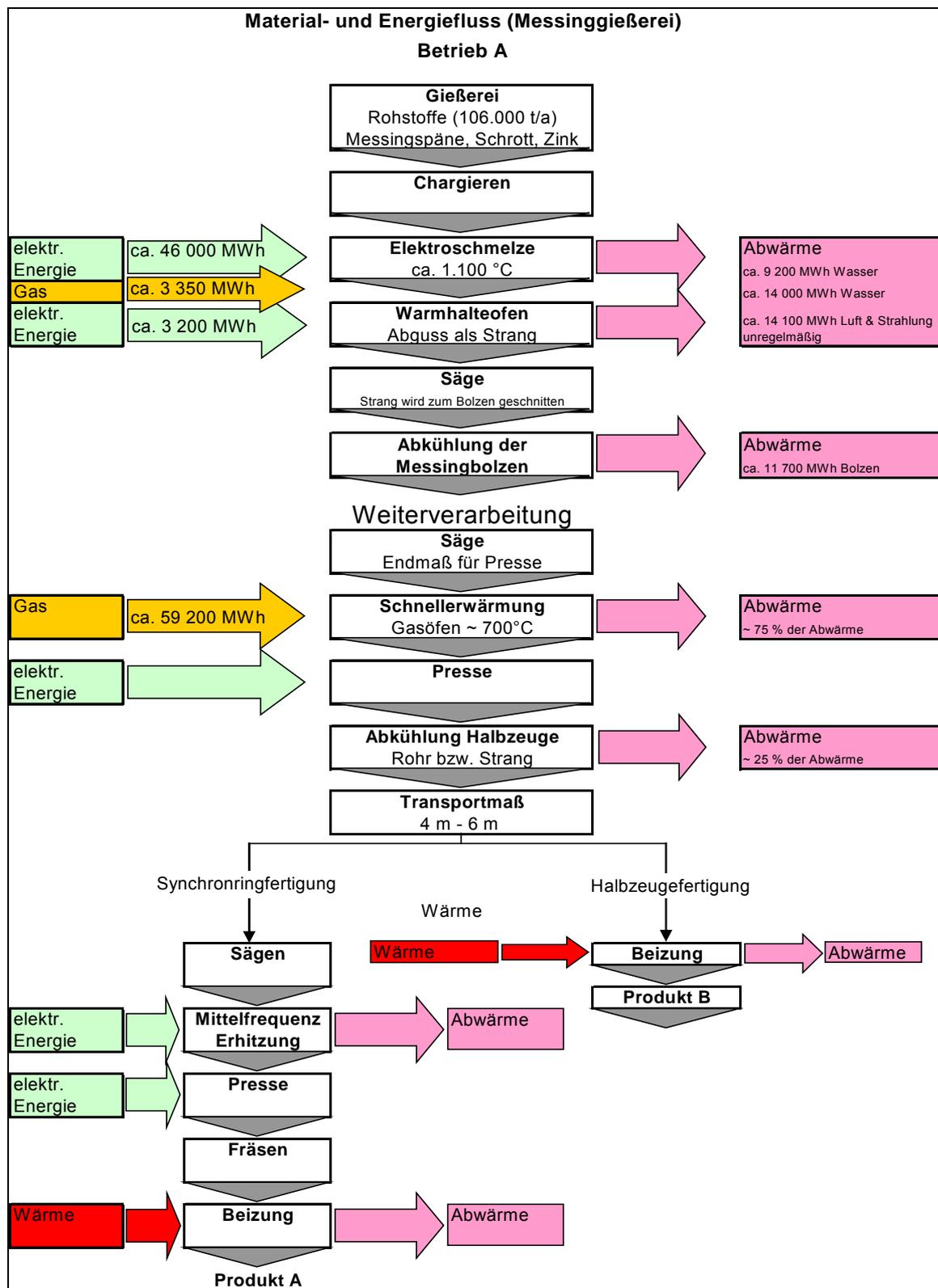


Abbildung 3-4: Material- und Energiefluss (Messinggießerei) Betrieb A

3.2 Betrieb B

Betrieb B ist eine weltweit tätige Aluminiumgießerei im Bereich der Automobilzulieferindustrie. Im untersuchten Werk werden ausschließlich Kolben produziert.

Am Standort existieren zwei räumlich getrennte Werksteile. Es sind hier ca. 1 200 Mitarbeiter beschäftigt. Die Werksfläche umfasst ca. 57 000 m².

Für den Schmelzprozess werden 6 Wannen- und 6 Kipptiegelöfen mit Gasbrennern eingesetzt. Die Kolben werden in Kokillen gegossen (26 Doppel-Kokillengießplätze).

Nach dem Gießen werden die Gussstücke abgeschreckt und einer Wärmebehandlung (Vergütung) sowie einer Oberflächenbehandlung bei ca. 220 °C zugeführt. Für die Vergütung wird als Energieträger Gas, für die Oberflächenbehandlung Strom eingesetzt. Der Betrieb ist in mehrere Werke aufgeteilt.

Abbildung 3-5 zeigt die Aufteilung des Erdgas- und Stromverbrauchs. Die Angaben beziehen sich auf das Werk 2, exklusiv des gekennzeichneten Energieflusses für Werk 1.

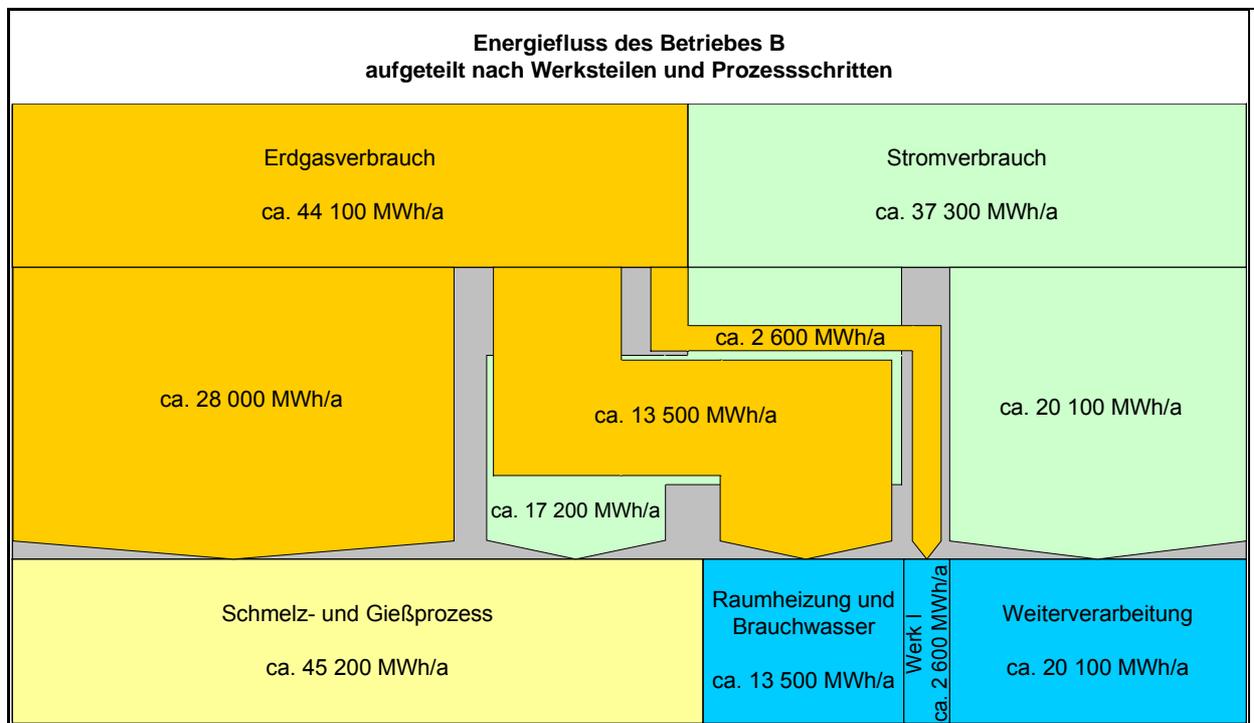
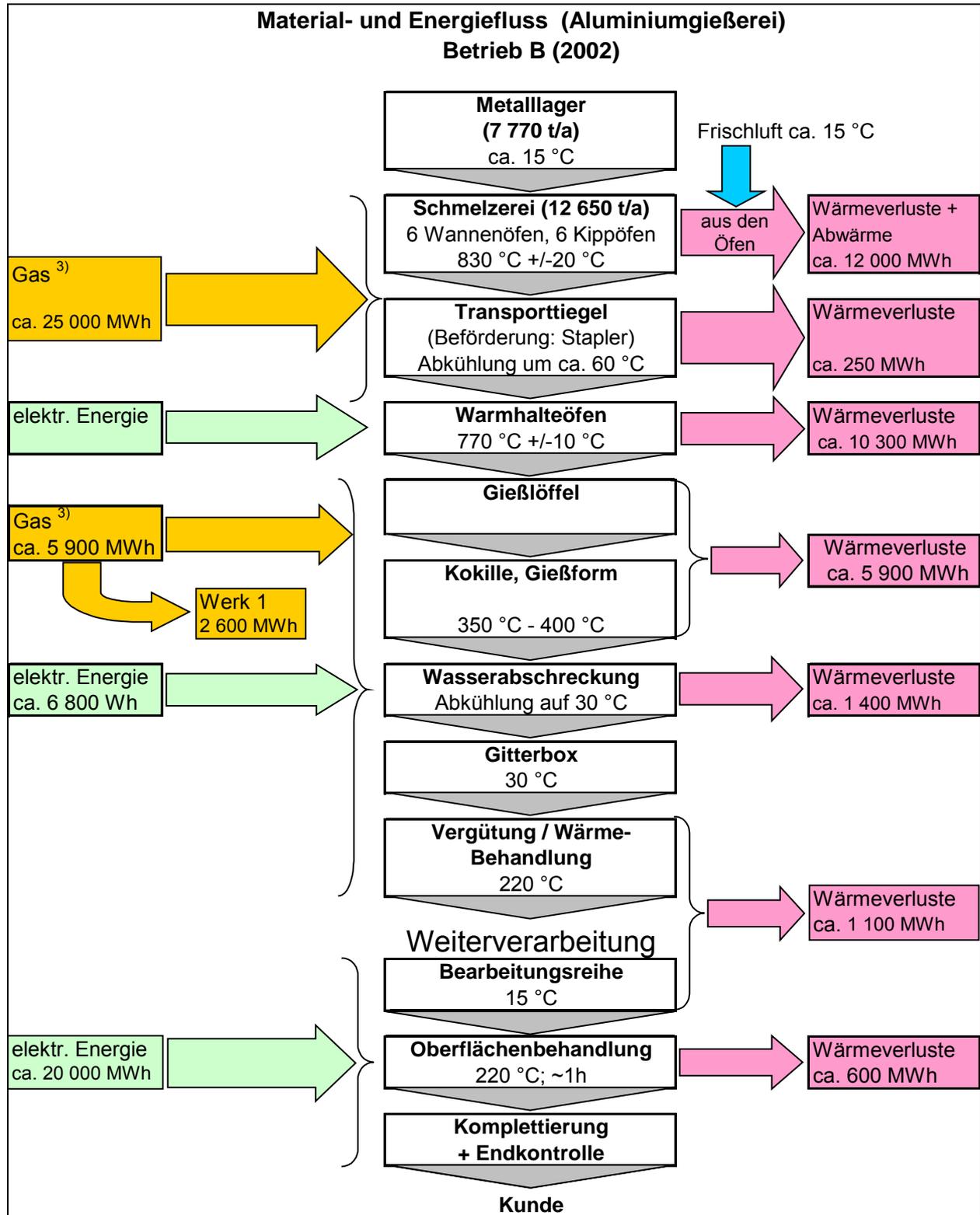


Abbildung 3-5: Energiefluss für Betrieb B aufgeteilt nach Werksteilen und Prozessschritten

Nachfolgend ist der Material- und Energiefluss für Betrieb B dargestellt.



³⁾ bei einer Kolbenrohlingstückzahl von 9,1 Mio./a

Abbildung 3-6: Material- und Energiefluss für Betrieb B

3.2.1 Spezifische Verbrauchswerte und Bewertung

Energie- und Materialflussdaten liegen für die Jahre 2002 und 2003 vor.

Spez. Gasverbrauch:

2002: ca. 2 000 kWh/t
2003: ca. 1 800 kWh/t

Es zeigt sich, dass durch Betriebsoptimierungen der spezifische Energieverbrauch kontinuierlich gesenkt werden konnte.

Die Analyse des Betriebs B zeigt darüber hinaus, dass

- der Energieverbrauch zum Schmelzen mit ca. 2 000 kWh/t (2002) bzw. 1 800 kWh/t (2003) vergleichsweise hoch ist. Der Schmelzwirkungsgrad beträgt ca. 20 %.
- der Stromverbrauch für die Vergütung ähnlich hoch (ca. 80 %) ist, wie der Gasverbrauch für die Nachbehandlung
- große Abwärmepotenziale an den Öfen anfallen.

Die hohen Verbrauchswerte lassen sich nicht ohne Weiteres erklären (mögliche Ursachen der Verluste: Alter der Schmelzöfen, Konstruktionsprinzip, Betriebsweise sowie die Auslastung)!

Die Firma ist dabei auf Flüssigmetallanlieferung umzustellen. Es erfolgt daher eine gesamtenergetische Bewertung des Prozesses „Flüssigmetallanlieferung“, bestehend aus:

- Einschmelzen in einer Sekundär-Aluminium Hütte
- Transport
- Warmhalten und Pufferung in der Gießerei

Durch die geplante Stilllegung der Schmelzerei ist eine Abwärmenutzung nicht mehr möglich.

3.3 Betrieb C

Im Betrieb C werden sowohl Aluminium- als auch Zinkgussteile produziert. Das eingeschmolzene Aluminium wird sowohl im Druckguss als auch im Kokillenguss verarbeitet.

Im Kokillenguss sind 7 Schmelzöfen (Schöpftiegelöfen) und 7 Gießplätze vorhanden. Im Zinkdruckguss werden 5 Maschinen eingesetzt. Das Zink wird elektrisch direkt an der Maschine geschmolzen. Zink wird ausschließlich in Druckgussmaschinen verarbeitet.

Im Werk arbeiten ca. 650 Mitarbeiter. Hergestellt werden in Groß- und Kleinstserien Rohgussteile und endmontierte Komponenten.

Zum Aluminiumdruckguss gehören 11 Druckgussmaschinen. Diese werden aus insgesamt 11 Schmelzöfen versorgt. Dabei handelt es sich um 2 Kipp- und 9 Schöpftiegelöfen.

3.3.1 Aufteilung des Erdgas- und Stromverbrauchs

Abbildung 3-7 zeigt die Aufteilung des Erdgas- und Stromverbrauchs.

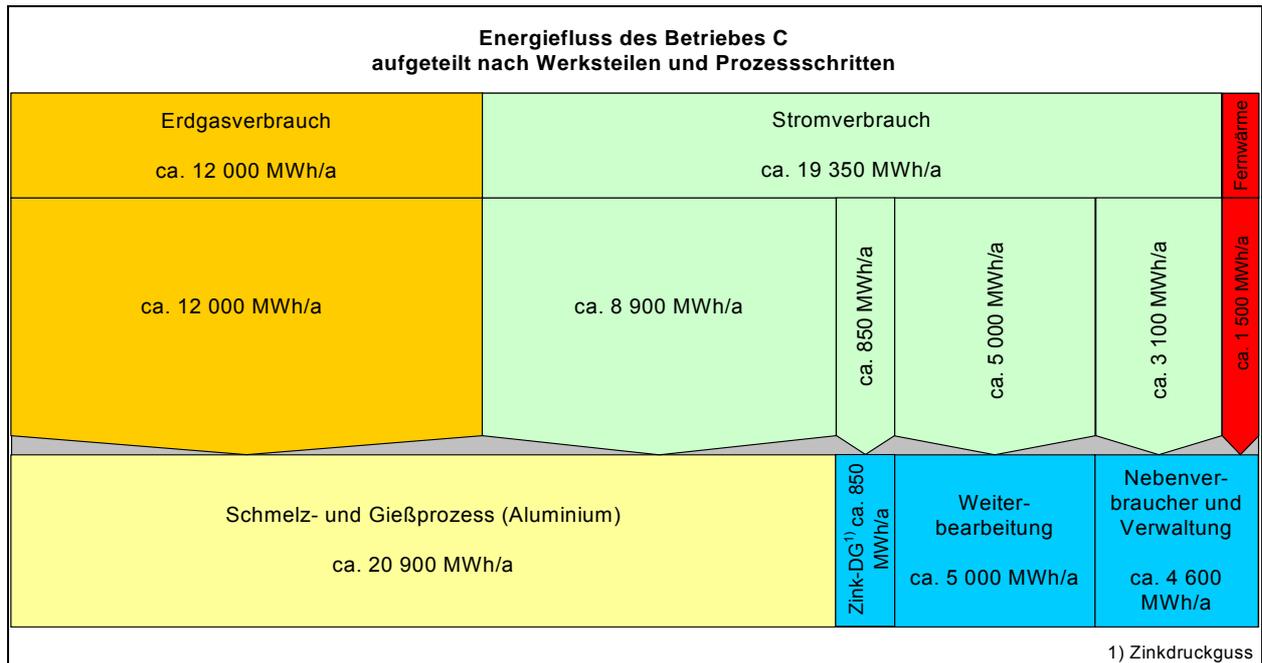


Abbildung 3-7: Energiefluss Betrieb C aufgeteilt nach Werkteilen und Prozessschritten

3.3.2 Material- und Energiefluss

Nachfolgend ist der Material- und Energiefluss für Betrieb C dargestellt.

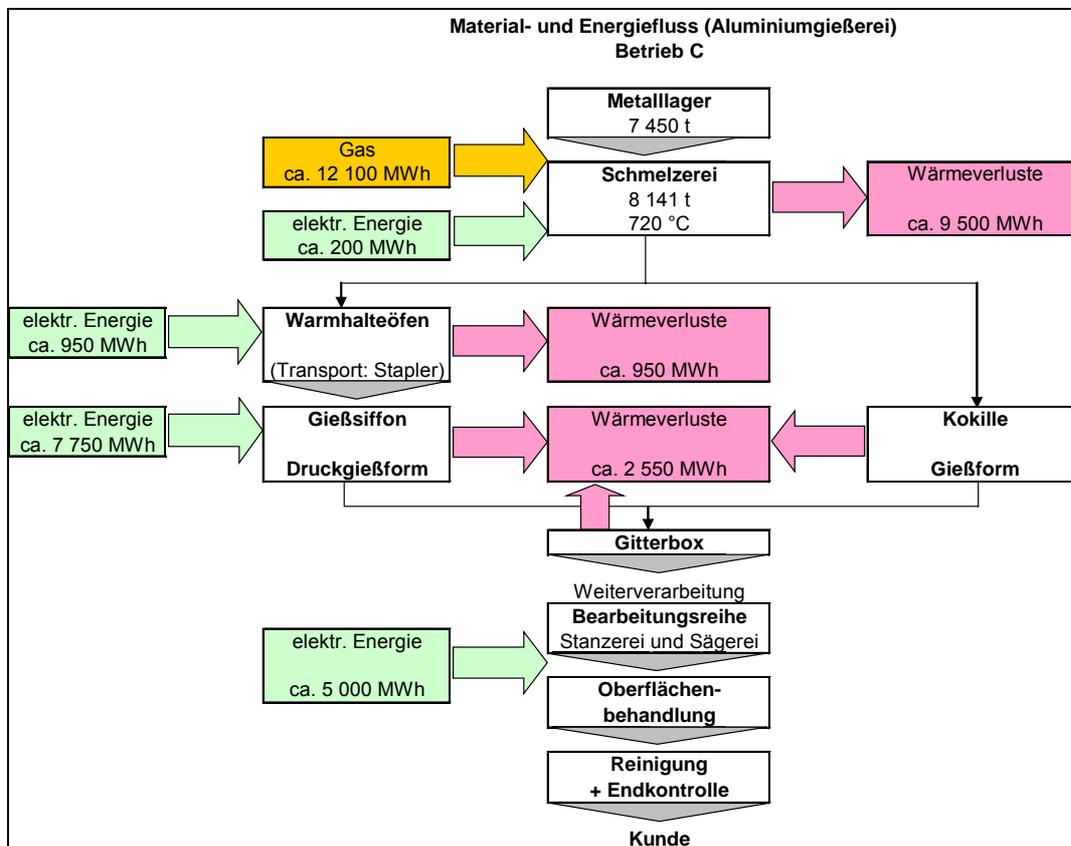


Abbildung 3-8: Material- und Energiefluss (Aluminiumgießerei) im Betrieb C

Tabelle 3-1: Zusammenstellung spezifischer Verbrauchswerte des Betriebes C

Strom	Gesamt [kWh]	spez. Verbr.: [kWh_{el}/t_{brutto}]	spez. Verbr.: [kWh_{el}/St]
Gieß-u. Schmelzerei	8.900.000	1.093	0,35
Bearbeitung	5.100.000	627	0,20
Summe:	14.000.000	1.720	0,55
Gas	Gesamt: [kWh]	spez. Verbr.: [kWh_{th}/t_{brutto}]	spez. Verbr.: [kWh_{th}/St]
Schmelzerei	12.100.000	1.500	0,45

Die Analyse des Betriebs C zeigt u.a., dass

- der Stromverbrauch für die Druckgussmaschinen ähnlich hoch (ca. 80 %) ist wie der Gasverbrauch für die Schmelzprozesse.
- der Energieverbrauch zum Schmelzen ca. 1 500 kWh/t (brutto) beträgt.
- der spez. Schmelzenergieverbrauch relativ hoch ist, der Schmelzwirkungsgrad beträgt ca. 22 %.
- die größten Abwärmepotenziale bei den Öfen anfallen.
- eine Abwärmenutzung (Ersatz der Fernwärme) in Betracht gezogen werden sollte.
- Es werden daher in einer vergleichenden Studie und einem Messprogramm die Tiegelöfen untersucht. Darüber hinaus wird das Abwärmepotenzial und die Abwärmeauskopplung an den gasbeheizten Schmelzöfen bewertet.

3.4 Betrieb D

Betrieb D entwickelt und liefert Produkte aus Aluminium und Magnesium für die europäische Fahrzeug- und Maschinenbauindustrie. Die Kernkompetenzen des Unternehmens liegen in der Herstellung von Getriebegehäusen und Getriebesteuerteilen sowie Fahrwerks- und Strukturteilen für die PKW- und LKW-Industrie. Die Mitarbeiterzahl beträgt ca. 770 Personen.

In der Schmelzerei wird Aluminium in Form von Block- und Rücklaufmaterial in Schachtschmelzöfen vorgewärmt und eingeschmolzen. Das flüssige Aluminium wird in Pfannen (ca. 750 kg) zu den entsprechenden Druckgießmaschinen transportiert.

Die Hauptenergieträger in dem Betrieb sind Gas und Strom (s. Abbildung 3-9).

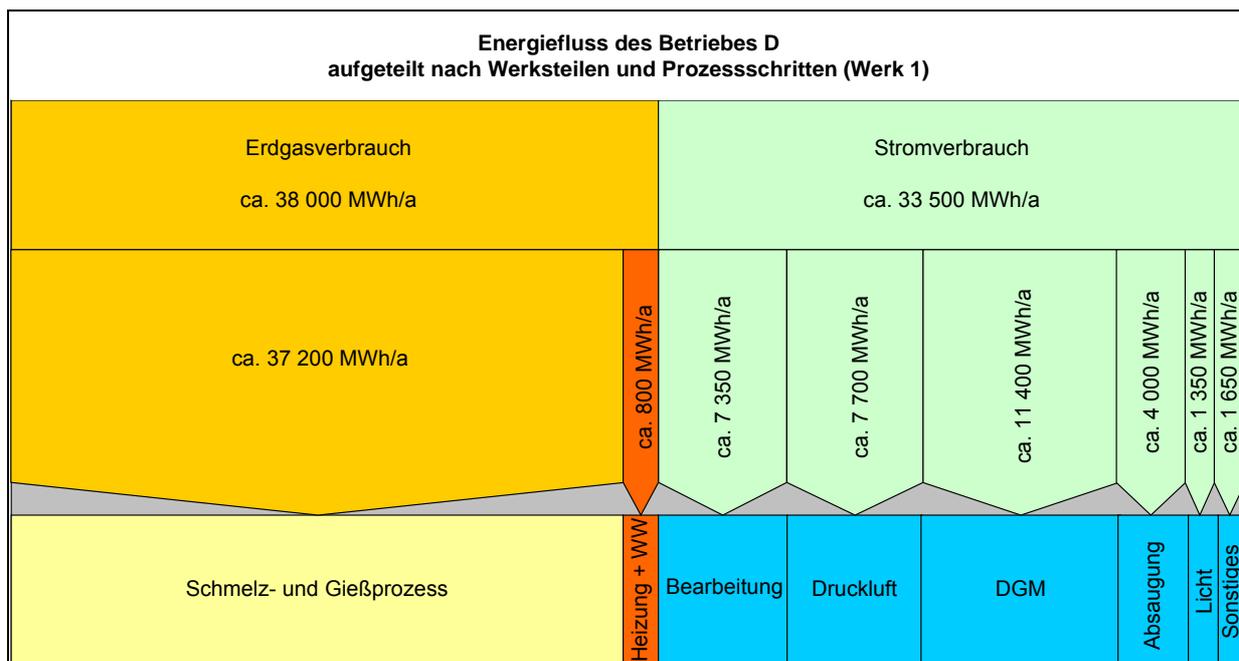


Abbildung 3-9: Energiefluss des Betriebes D aufgeteilt nach Werksteilen und Prozessschritten (Werk1)

Nach dem Druckgießen werden die Gussteile in den entsprechenden Hallen weiterbearbeitet (s. Abbildung 3-10).

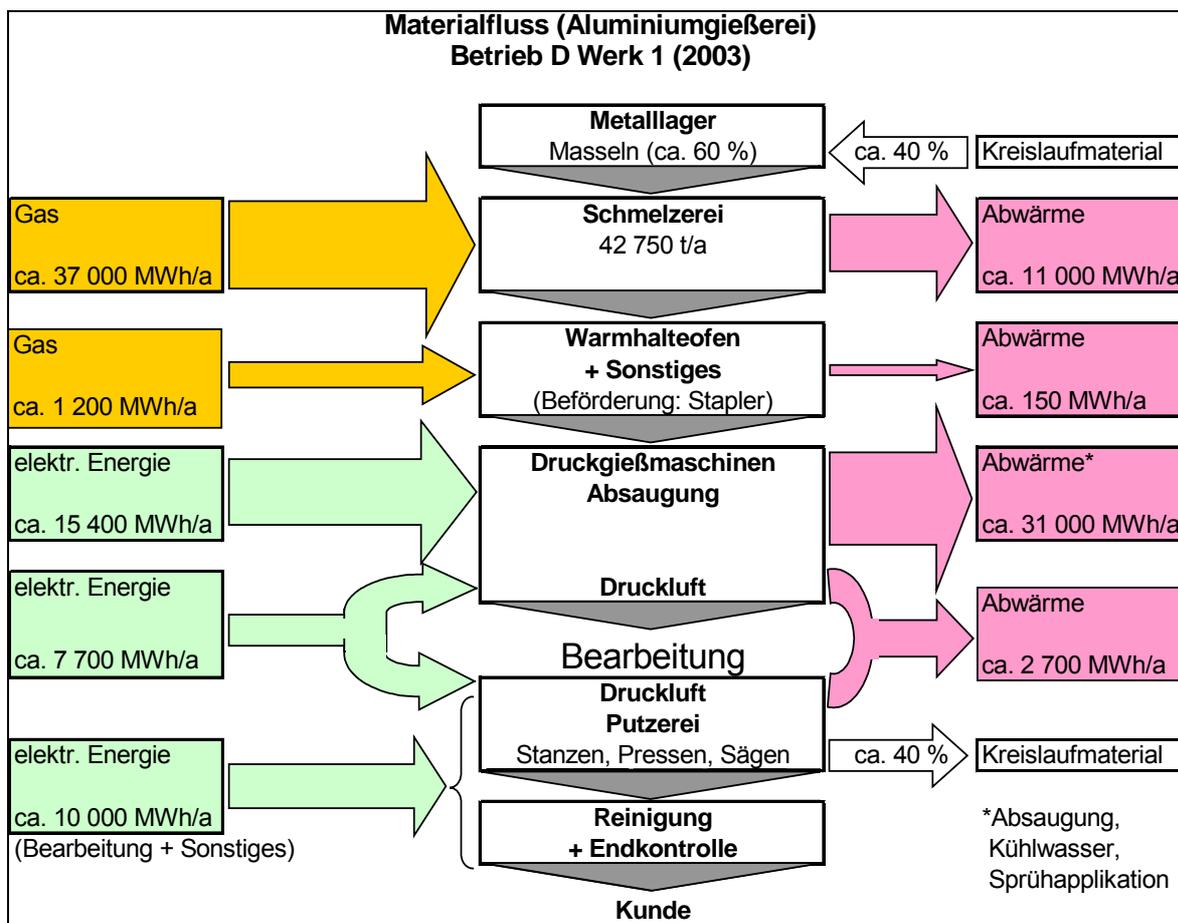


Abbildung 3-10: Material- und Energiefluss im Betrieb D

Der Energieaufwand für die Primärproduktion von Aluminium aus Tonerde in einer Schmelzfluss-elektrolyse beträgt 12 900 – 17 700 kWh_{el}/t. Demgegenüber steht ein verhältnismäßig geringer Aufwand von nur 600 – 900 kWh_{th}/t zum Einschmelzen von Block- und Kreislaufaluminium (Sekundärproduktion) in Schachtschmelzöfen. Für einen Vergleich verschiedener Ofentypen hat sich der mittlere spezifische Energieverbrauch zum Aufschmelzen und Warmhalten im Teillastbetrieb bewährt (siehe Tabelle 3-2).

Im Betrieb D setzt sich die angegebene Schmelzproduktion aus 60 % Blockaluminium (Masseln) und 40 % Kreislaufmaterial zusammen.

Tabelle 3-2: Gesamter und mittlerer spezifischer Energieverbrauch 2003 für den Betrieb D

Aluminium-Produktion (Brutto = Block + Kreislauf) t _{Brutto} /a	Strom	Gesamt kWh _{el}	Spezifischer Verbrauch kWh _{el} /t _{Brutto}
42 750	Al-Druckgießmaschinen, Druckluft, Bearbeitung	33 500 000	780
Gesamt m ³ Erdgas	Gas	Gesamt kWh _{th} ¹⁾	Spezifischer Verbrauch kWh _{th} /t _{Brutto}
3 750 000	Schachtschmelzöfen (Aluminium)	37 500 000	880
¹⁾ H _u = 10 kWh _{th} /m ³			
Schmelzaufwand:			
Theoretisch ermittelt:		320 kWh _{th} /t _{Brutto}	
Spezifischer Verbrauchswert bezogen auf Tonne Rohmaterial:		880 kWh _{th} /t _{Brutto}	
Schmelzwirkungsgrad:		36 %	

Die Energieanalyse des Betriebes D zeigt, dass

- der Stromverbrauch für die Druckgießmaschinen mit 33 500 000 kWh_{el} ähnlich hoch ist wie der Gasverbrauch für die Schmelzanlagen.
- der Druckgießprozess mit 37 500 000 kWh_{th} einen höheren Stromverbrauch als die Druckluftkompressoren, die Bearbeitung und die Absauggebläse benötigt.
- der gesamte spezifische thermische Energieverbrauch inklusive Warmhaltung bei ca. 880 kWh_{th}/t_{Brutto} liegt.
- der durchschnittliche Schmelzwirkungsgrad der Schachtschmelzöfen 36 % beträgt.
- die größten Abwärmepotenziale im Abgasstrom der Schachtschmelzöfen vorliegen.
- der Betrieb bis auf das Heizungssystem über keine möglichen Wärmeabnehmer verfügt.

4 Gas-/Ölbefeuerte Schmelz- und Warmhalteöfen

Die Energieanalysen in den Firmen zeigen, dass der Schmelzprozess zu den wesentlichen Energieverbrauchern zählt. Daher wird das Hauptaugenmerk auf die Effizienz der Schmelz- und Warmhalteöfen gelegt. Schobesberger /14/ beziffert das Einsparpotenzial moderner Öfen durch Reduzierung der Verluste auf 44 % und sieht für zukünftige Öfen sogar eine Einsparung von 56 %.

Hier dargestellt (Bottom-Up) sind mögliche energetische Verlustreduzierungen, unter Beibehaltung des identischen Nutzwärmeanteils.

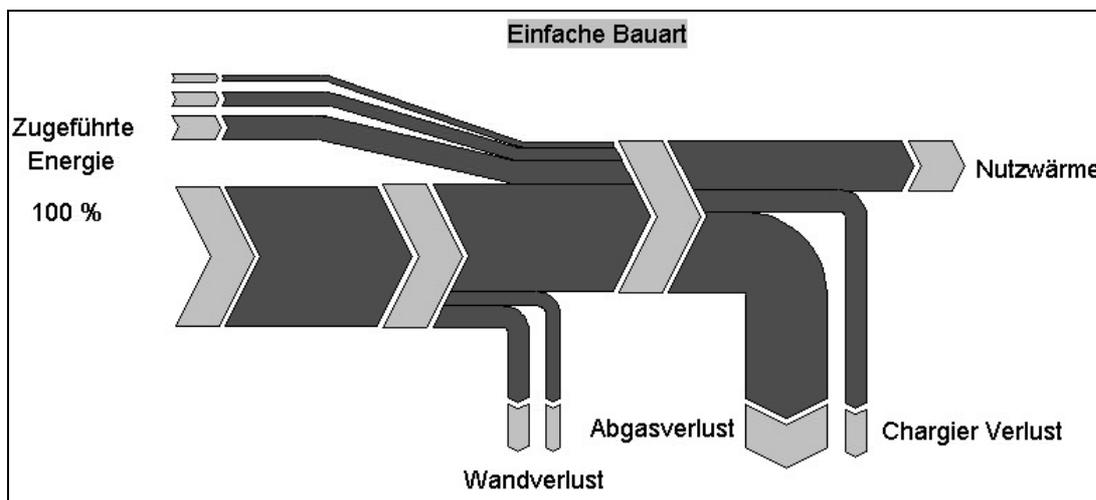


Abbildung 4-1: Energieflüsse an Öfen einfacher Bauart /14/

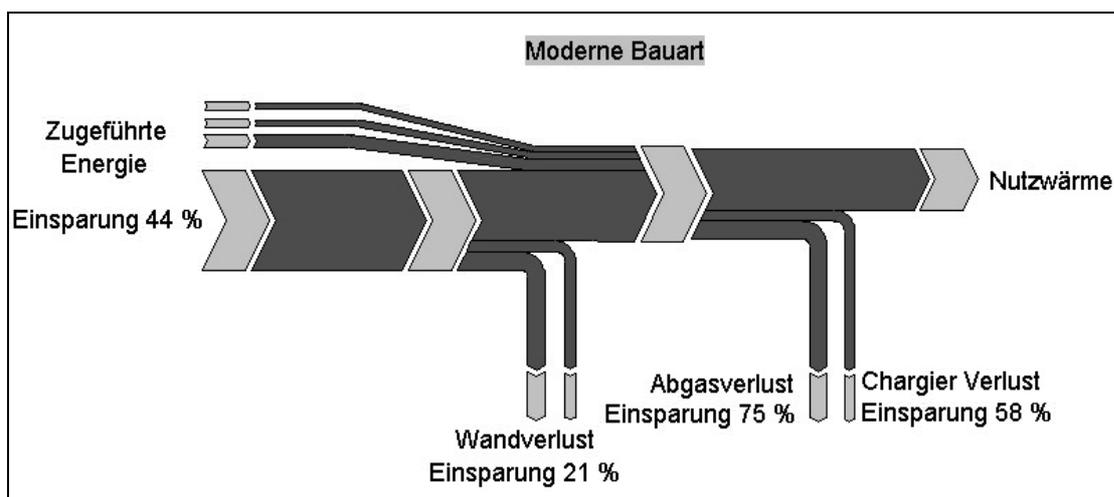


Abbildung 4-2: Energieeinsparpotenzial an Öfen moderner Bauart /14/

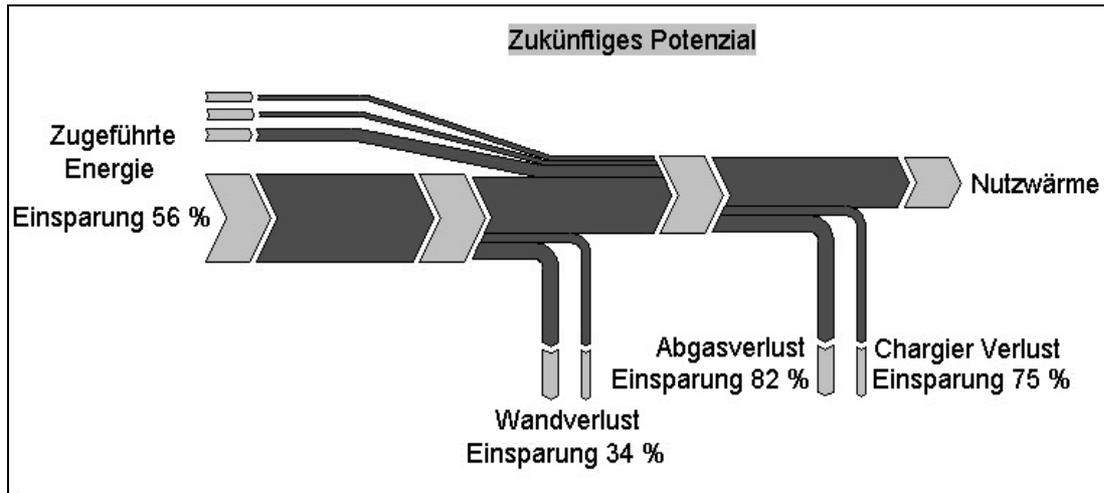


Abbildung 4-3: Energieeinsparpotenzial zukünftiger Öfen /14/

4.1 Energiebilanz und Wirkungsgrade

Die typischen Energieflüsse an einem Schmelzofen zeigt Abbildung 4-4.

Zugeführt wird über gas- oder ölbefeuerte Brenner die Feuerungsleistung Q_F . Zusätzlich wird dem Ofen noch Wärme über den Wärmeinhalt des Brennstoffs Q_{Br} und der Verbrennungsluft Q_L zugeführt. Weitere Wärme entsteht durch den so genannten Abbrand, z.B. Oxidation von Aluminium $Q_{Al, Ox}$.

Wärmeverluste im Ofen entstehen durch Wärmeabstrahlung und Konvektion über die Ofenwände (Q_W) sowie durch den Ofenbetrieb, z.B. Füllen und Entleeren, hier mit Chargierverluste $Q_{Chargier}$ bezeichnet.

Nutzwärme ist die Energie, die im Idealfall benötigt wird, um Aluminium von 20 °C auf 730 °C zu erwärmen und zu schmelzen ($320 \text{ kWh}_{th}/t_{Al}$).

Aus dem Ofen treten die Abgase mit einer Temperatur $\vartheta_{A,1}$ aus und besitzen dabei einen Energieinhalt $Q_{A,1}$. Findet eine Wärmerückgewinnung statt, so wird die Verbrennungsluft vorgewärmt, und die Temperatur und der Energieinhalt der Abgase verringern sich auf $\vartheta_{A,2}$ bzw. $Q_{A,2}$.

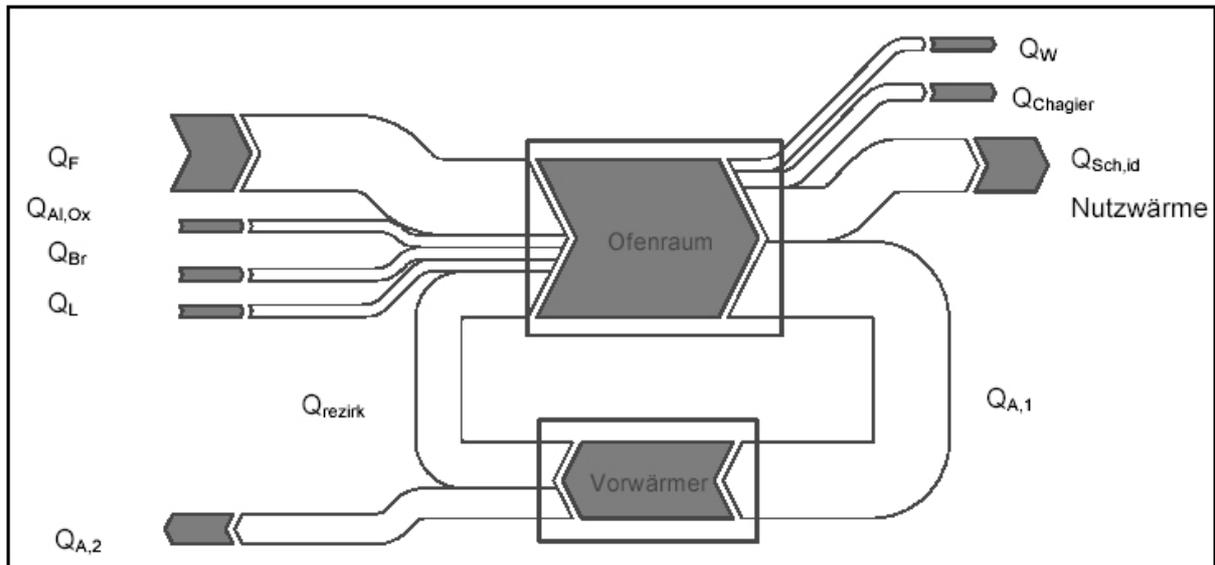


Abbildung 4-4: Typische Energieströme in einem modernen Schmelzofen /23/

An diesem Energieflussbild werden die neben der spezifischen Schmelzleistung wichtigsten Kenngrößen – der Schmelzwirkungsgrad η_{Sch} und der Feuerungstechnische Wirkungsgrad η_F – deutlich:

Schmelzwirkungsgrad (Verhältnis der Nutzwärme zur zugeführten Wärme):

$$\eta_{SCH} = Q_{Sch,id} / Q_F \text{ in [\%]}$$

Feuerungstechnischer Wirkungsgrad (Verhältnis der Nutzwärme + Wand- und Chargierverluste zur zugeführten Wärme):

$$\eta_F = (Q_{Sch,id} + Q_W + Q_{Chargier}) / Q_F \text{ in [\%]}$$

Spezifische Schmelzenergie (Verhältnis der zugeführten Wärme zur Menge des geschmolzenen Materials, L_{tats})

$$q_{Sch,tats} = Q_F / L_{tats} \text{ in [kWh/t]:}$$

4.2 Teillastverhalten von Schmelzöfen

Schmelzöfen werden in aller Regel nicht dauerhaft im Aufschmelzbetrieb, sondern auch zum Warmhalten eingesetzt. Bei geringer Auslastung der Schmelzöfen zeigt Abbildung 4-5 für einen Kipptiegelofen eine Verschlechterung der Schmelzwirkungsgrade und eine signifikante Erhöhung der spezifischen Schmelzenergie.

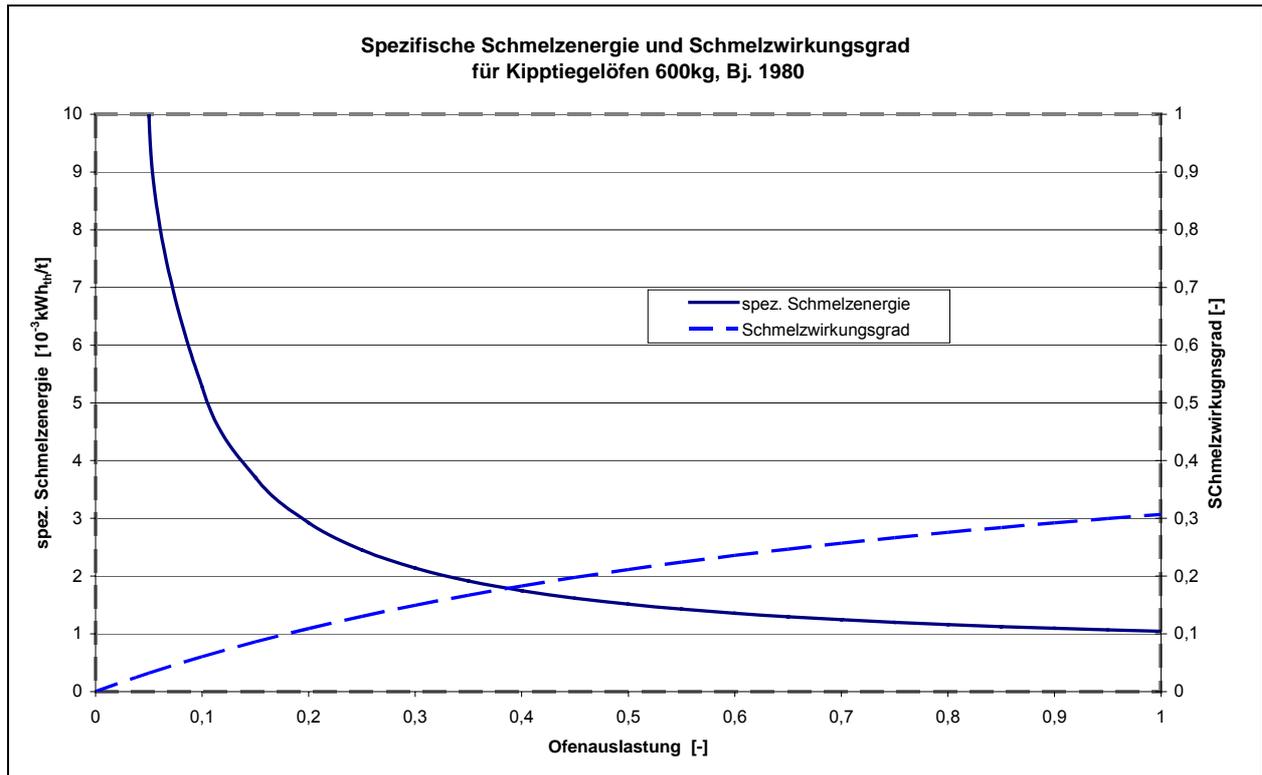


Abbildung 4-5: Spezifische Schmelzenergie und Schmelzwirkungsgrad für einen Kipptiegelofen bei unterschiedlicher Ofenauslastung.

Insbesondere bei älteren Öfen mit hohen Wand- und Chargieverlusten steigt bei geringer Auslastung der Öfen die tatsächliche erforderliche Schmelzenergie erheblich an.

4.3 Ofenbauarten und Kennwerte

Die Auswahl des Schmelzofentyps, welcher in Sekundärschmelzbetrieben eingesetzt wird, hängt von dem Einsatzmaterial (Masseln, Coils, Barren, Schrott, Späne und Rücklaufmaterial), der Menge an zu schmelzendem Aluminium, der Art und Weise des Schmelzens, der Schmelzbehandlung und dem Aufbau des Schmelzbetriebes ab.

Für das Aufschmelzen von Recyclingmaterial werden in so genannten Sekundärhütten Drehtrommelöfen eingesetzt.

Die unterschiedlichen Ofentypen werden in folgenden Kapiteln beschrieben und hinsichtlich ihrer energetischen Kennwerte analysiert.

Eine Übersicht zu den gängigen brennstoffbeheizten Schmelzöfen für Aluminium in Sekundärschmelzbetrieben enthält Tabelle 4-1:

Tabelle 4-1: Ofentypen und deren Einsatzkriterien

Auswahlkriterium	Tiegelofen	Schachtschmelzofen	Herd-/Wannenofen	2-Kammer-schmelzofen
Größe	0,05 – 1,0 t	2,0 – 10 t	5,0 – 40 t	10 – 40 t
Schmelzleistung	gering	hoch	mittel	hoch
Warmhaltebetrieb	geeignet	geeignet	sehr gut geeignet	--
Chargierung	diskontinuierlich	kontinuierlich	diskontinuierlich	diskontinuierlich
Legierungswechsel	geeignet	Spülung erforderlich	Spülung erforderlich	Spülung erforderlich
Einsatzmaterial	Block Kreislaufmaterial	Block Kreislaufmaterial	Block Kreislaufmaterial Späne	Block Kreislaufmaterial Späne
Brenner	Kaltluftbrenner Rekuperationsbrenner	Kaltluftbrenner Rekuperationsbrenner Regenerativbrenner Oxi-Brenner	Kaltluftbrenner Rekuperationsbrenner Regenerativbrenner Oxi-Brenner	Kaltluftbrenner Rekuperationsbrenner Regenerativbrenner Oxi-Brenner
Abwärmenutzung aus dem Abgas	sehr gut (reines Abgas, hohe Temperaturen)	gut	gut (insbesondere Warmhalteöfen)	aufwendig, da belastete Abgase
typische spez. Schmelzenergien mit Kaltluftbrenner */17/, /27/	800 – 1 800 kWh _{th} /t	580 – 900 kWh _{th} /t	1 080 kWh _{th} /t	1 390 kWh _{th} /t
spez. Schmelzenergie mit Regenerator* /17/	--	540 kWh _{th} /t	530 kWh _{th} /t	580 kWh _{th} /t

* Die spezifischen Schmelzenergien können nicht allgemein gültig angegeben werden. Sie sind von der Betriebsweise, Alter und Legierung abhängig.

4.4 Tiegelöfen

Der Tiegelofen wird indirekt mit Strom, Gas, Koks oder Öl beheizt und kann feststehend oder kippbar gebaut sein. Kippbare Tiegelöfen können um die Achse des Massenschwerpunktes oder um die Gießschnauze gekippt werden. Bei dieser Ausführung bleibt die Höhe der Schnauze über Flur während des Kippens immer gleich. Nicht-kippbare Tiegelöfen, so genannte Standtiegel, werden in aller Regel von Hand beschickt und ausgeschöpft. Weitere Informationen finden sich unter /37/45/ und /46/ bzw. auf den Webpages von Herstellern /47/ und /48/.

Ein im Ofen befindlicher fest installierter oder herausnehmbarer feuerfester Tiegel aus Graphit, Guss, Siliziumkarbid oder Stahlblech dient zur Aufnahme des zu schmelzenden Metalls. Die Möglichkeit des schnellen Tiegelwechsels beim Wechseln von Legierungen verleiht dem Tiegelofen ein Höchstmaß an Flexibilität.

Tiegelöfen werden für Produkte mit hohen Qualitätsanforderungen bei geringen bis mittleren Tagesleistungen eingesetzt (0,1 – 0,5 t/h). Durch die geringe Badoberfläche im Verhältnis zum Volumen und der Tatsache, dass durch die indirekte Beheizung die Schmelze nur mit ruhender Luft in Kontakt kommt, entsteht nur ein geringer Abbrand.

Den Aufbau eines Standtiegelofens zeigt Abbildung 4-6.

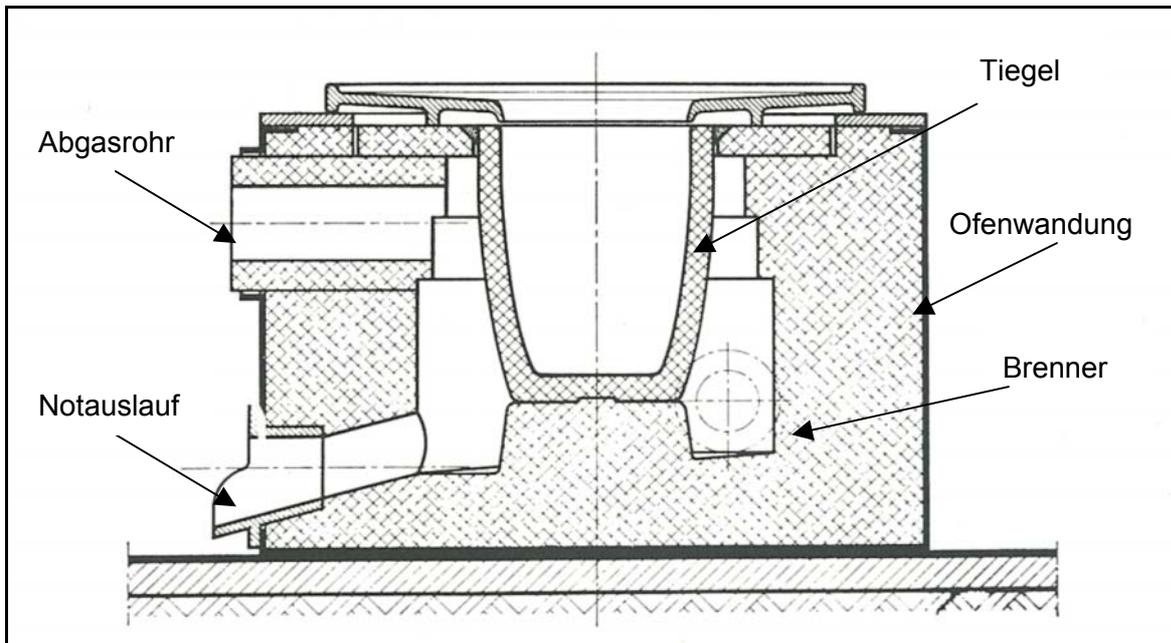


Abbildung 4-6: Schnitt durch einen feststehenden brennstoffbeheizten Tiegelofen /46/

Aus energetischer Sicht ist von Bedeutung:

- regelmäßige Erneuerung der Tiegel sinnvoll und notwendig, da neue Tiegel einen besseren Wärmedurchgang besitzen
- gute Umspülung des Tiegels durch die Brennerflamme und optimierte Abgasführung
- geringe Wärmeverluste durch Dämmung der Ofenwandung und Abdichten des Notauslaufs
- Abdeckung des Tiegels im Warmhaltebetrieb

Merkmale von Tiegelöfen

- Schmelzleistung 0,1 – 0,5 t/h
- Beschickung per Hand
- max. Größe der Tiegel bei 1 000 kg
- geeignet für jede Legierungsart
- hoher Betriebsmittelverbrauch (Tiegel) durch Beschädigung und Belastung
- preisgünstig
- diskontinuierliches Schmelzen
- geringe energetische Effektivität (900 – 2 400 kWh/t)

Tiegelöfen älterer Bauart haben hohe Abgas- und Wandverluste. Hier existiert ein großes Verbesserungspotenzial. Am Beispiel des Tiegelofen Bauart, KLV 600, Auslastung 45 % kann erläutert werden, wie sich die Aufteilung von Nutzwärme und Verlusten darstellt.

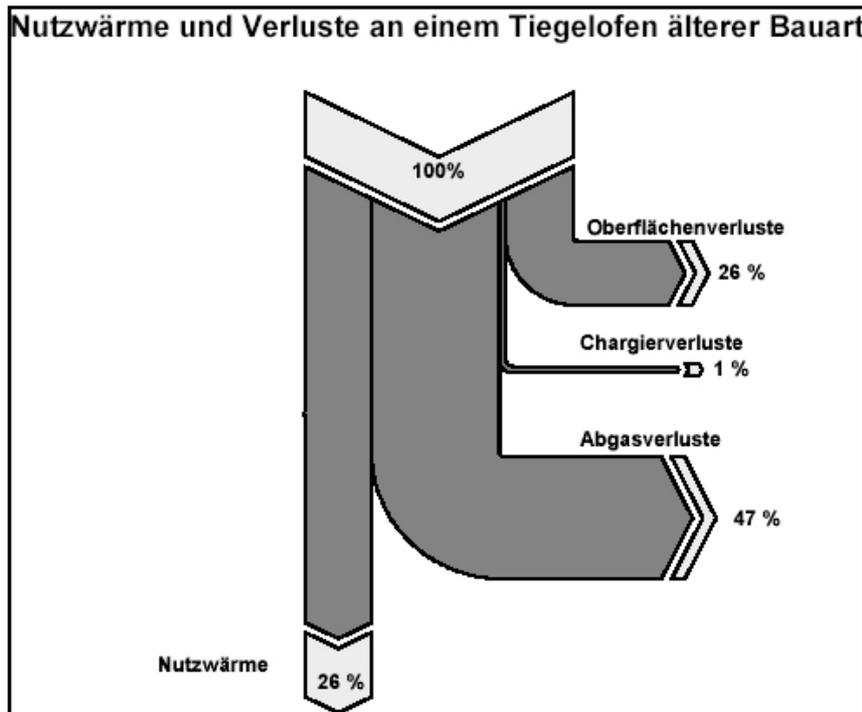


Abbildung 4-7: Aufteilung von Nutzwärme und Verlusten in einem Tiegelofen älterer Bauart, KLV 600, Auslastung 45 %

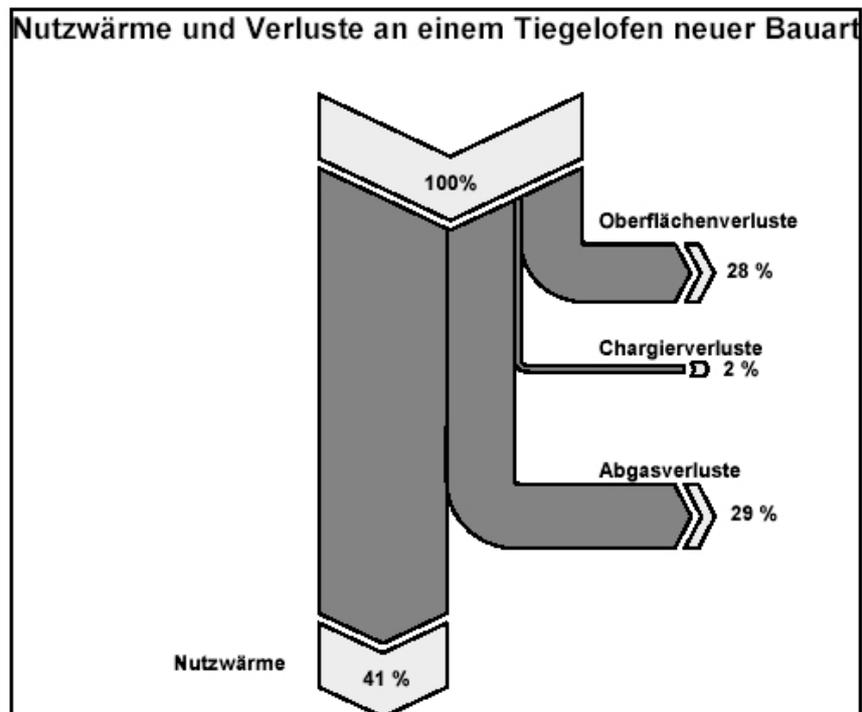


Abbildung 4-8: Aufteilung von Nutzwärme und Verlusten in einem Tiegelofen neuer Bauart, KLV 600, Auslastung 45 %

Moderne Tiegelöfen erreichen durch moderne Brennertechnik (Rekuperatoren), Abdeckung und Dämmung einen Nutzungsgrad von über 40 %, ältere hingegen erreichen hiervon nicht ein Drittel /22/. Hierbei sind die relativen Oberflächen- und Chargierverluste an den Tiegelöfen älterer Bauart nur geringfügig schlechter. Einen großen Unterschied stellen die Abgasverluste dar, die bei Tiegelöfen älterer Bauart mit 47 % angegeben werden können. Bei modernen Tiegelöfen sind ca. 28 % erreichbar.

Da Tiegelöfen oftmals als Warmhaltebehälter eingesetzt werden, ist insbesondere Abdeckung, Abdichtung des Notauslaufes, Verhinderung der Luftzirkulation im Stillstand und Dämmung der Wandung von Bedeutung.

4.5 Schachtschmelzöfen

Ein Schachtschmelzofen wird in der Regel für sauberes Rücklauf- und Blockmaterial eingesetzt. Dieser Ofentyp besteht aus einem schachtförmigen Beschickungsteil mit Schmelzzone und einer Warmhalte-Sammelwanne für das geschmolzene Metall. Die Vorwärmung und Trocknung des aufgegebenen Schmelzgutes erfolgt durch die Abgase, die durch den Beschickungsschacht nach oben ziehen. Das verflüssigte Material fließt ständig in den tiefer gelegenen Wannerraum /29/.

4.5.1 Schachtschmelzofen StrikoWestofen

Der schematische Aufbau des Schachtschmelzofens ist in Abbildung 4-9 dargestellt. Mit den Schmelzbrennern wird die notwendige Energie der Schmelzzone zugeführt. Die Rauchgase werden durch das im Schacht befindliche Schmelzgut geleitet. Im oberen Schachtbereich wird das Schmelzgut erhitzt und die Feuchtigkeit ausgetrieben. Im unteren Teil des Schmelzschachtes wird das nachrutschende Material weiter vorgewärmt. Am Schachtfuß ist das Material soweit vorgewärmt, dass es durch Zuführung geringer Energiemengen schnell den Schmelzzustand erreicht. Das schmelzflüssige Material fließt von der Schmelzzone in den Warmhaltebereich. Hier wird die Warmhaltetemperatur, die ca. 720 °C beträgt, über ein temperaturgesteuertes Brennersystem (Warmhaltebrenner) eingestellt.

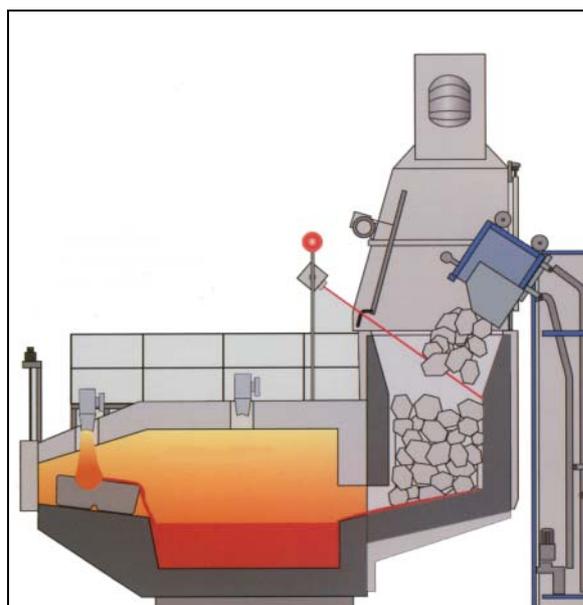


Abbildung 4-9: Schachtschmelzofen der Firma StrikoWestofen

Bei kontinuierlichem Betrieb liegen die Abgastemperaturen in Abhängigkeit von der Betriebsweise des Ofens zwischen 200 °C und 400 °C. Der Beschickungsvorgang für den Ofen soll automatisch ausgelöst werden, wenn der Schachtfüllstand abgesunken ist und die Abgastemperatur ansteigt.

Schachtschmelzöfen werden häufig in folgenden drei Betriebsweisen gefahren:

Betriebsart

1. Schmelzen
2. Warmhalten
3. Schmelzen und Warmhalten

Für den reinen Schmelzbetrieb (Warmhaltebrenner außer Betrieb) gibt der Hersteller einen Verbrauch von $600 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{t}_{\text{Al}}$ an, wenn die Chargierung sich aus 50 % Masseln und 50 % stückigem Rücklaufmaterial zusammensetzt. Zum Schmelzen von 100 % Blockmaterial werden hingegen $690 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{t}_{\text{Al}}$ benötigt. Das reine Warmhalten bei geschlossener Abgasklappe erfordert eine Erdgasmenge von $180 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{h}$. Der Erdgasverbrauch pro Tonne Aluminium bei kombiniertem Schmelz- und Warmhaltebetrieb wurde für typische Schachtschmelzöfen je nach Betriebsart zwischen $600 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{t}_{\text{Al}}$ und $900 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{t}_{\text{Al}}$ gemessen. Die Praxiswerte für Abbrandverluste, das sind auftretende Metallverluste durch Oxidation, bewegen sich üblicherweise zwischen 1 % und 2 % in Abhängigkeit vom Einsatzmaterial.

Ein Vergleich des Erdgasverbrauches in einem typischen Betrieb zeigt, dass es energiesparend ist, am Wochenende bzw. im schmelzfreien Warmhaltebetrieb die Aluminiumschmelzbad-Temperatur von 700 – 750 °C auf 660 – 680 °C zu reduzieren. Eine auf die Zeit und den Warmhaltebad-Inhalt (WB) bezogene massenspezifische Kennzahl ermöglicht den Vergleich der Energieverbrauchswerte.

Tabelle 4-2: Erdgasverbrauch von Schachtschmelzöfen im kombinierten und Warmhaltebetrieb (Produktions- und Wochenendbetrieb)

		Kombinierter Betrieb	Warmhaltebetrieb
Dauer	h	72	33
Erdgas für Schmelzbrenner	m³	9 088	-
	kWh	90 880	-
Erdgas für Warmhaltebrenner	m³	3 060	1 059
	kWh	30 600	10590
Spezifischer Erdgasverbrauch* Warmhaltebrenner	m³/(t_{WB} h)	5,7	4,2
	kWh/(t_{WB} h)	57	42
Badtemperatur	°C	700 – 730	660 - 680

* Schmelzproduktion: 135 t Aluminium, Annahme Badinhalt: 7,5 t

4.5.2 Schachtschmelzofen LOI

Der Schachtschmelzofen der Firma LOI /67/ wird in Druck-, Sand- und Kokillengießereien als zentraler Vor- und Rückschmelzofen für Aluminium-Masseln und -Rücklaufmaterial eingesetzt. Das im Schacht befindliche Schrott-/Rücklauf-/Masselmateriale wird durch die heißen Verbrennungsgase vorgewärmt. Zur Zeit ist noch kein Typ dieses Ofens im Einsatz.



Abbildung 4-10: Studie eines Schachtschmelzofens der Firma LOI /67/

4.5.3 Schmelzofen mit kurzem Schacht ZPF therm

Die Firma ZPF therm Maschinenbau GmbH stellt Aluminium-Schmelz- und Warmhalteanlagen her. Die Öfen besitzen in Abhängigkeit von der Betriebsweise eine (hohe) durchschnittliche Verfügbarkeit von 80 – 85 %. Der Erdgasverbrauch beträgt $600 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{t}_{\text{Al}}$ bei einem gut abgestimmten Verhältnis von Rücklauf zu Masseln. Bei ausschließlicher Masselchargierung werden $700 - 750 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{t}_{\text{Al}}$ benötigt. Es handelt sich bei den ZPF-Öfen um kombinierte Schmelz- und Warmhalteöfen mit kurzem Schacht. Sie werden in vier verschiedenen Größen gefertigt.

Tabelle 4-3: Übersicht der Aluminium-Schmelz- und Warmhalteanlagen (Firma ZPF therm)

Schmelzleistung	300 kg/h	1 000 kg/h	1 500 kg/h	3 000 kg/h
Wanneninhalt	700 kg	2 250 kg	5 000 kg	10 000 kg

Im ZPF-Ofen wird das zu schmelzende Aluminium entweder von oben mit Hilfe eines Hebe-Kippgerätes oder direkt mit dem Stapler von der Seite beschickt. Es fällt auf die auf halber Höhe eingemauerte Schmelzbrücke, die als Gefälle konstruiert ist, damit das geschmolzene Aluminium in das darunter liegende Warmhaltebad abfließen kann. Ein Erdgasbrenner ist oberhalb der Schmelzbrücke diagonal angeordnet und feuert direkt auf das Chargiermaterial, das auf der Schmelzbrücke liegt. Verflüssigt fließt es in das Warmhaltebad ab. Die heißen Abgase strömen aus dem oberen rechten Schmelzbereich nach links über die Schmelzbrücke, um dann unterhalb der Schmelzbrücke in entgegengesetzter Richtung bis zum anderen Ende des Ofens (Kamineintritt) umgeleitet zu werden.

4.5.4 Regenerator-Schachtschmelzofen mit kurzem Schacht

Die Regenerator-Schachtschmelzöfen der Firma Jasper sind kombinierte Schmelz- und Warmhalteöfen. Sie besitzen eine Schmelzleistung von 2,5 bis 5 t/h bei einem Badinhalt von 5 bis 25 t /68/. Diese Öfen weisen die in der Abbildung 4-11 dargestellte Ofengeometrie auf. Masseln und Rücklaufmaterial in jeder Form und Größe können in dem Ofen eingesetzt werden. Der Schmelzbereich ist, bei einem extrem kurzen Schacht, sehr großflächig ausgeführt.

Der Warmhaltebereich ist physikalisch vom Schmelzbereich des Ofens getrennt. Überschüssige Wärmeenergie wird den oben direkt am Schacht sitzenden Regeneratoren zugeführt. Bei diesem System wird immer die im Abgas enthaltene Wärmeenergie an die Verbrennungsluft übertragen. Bei diesem Feuerungskonzept kann die Abgastemperatur max. 250 °C nicht übersteigen.

Der Energieverbrauch für das Schmelzen liegt bei einzelnen Chargen unter 460 kWh_{th}/t_{Al} für das Schmelzen und Warmhalten bezogen auf ein Produktionsjahr bei 750 kWh_{th}/t_{Al}. Zur Entnahme der Schmelze lässt sich der Ofen bis 29° kippen. Dieser Ofentyp ist in einem Umschmelzwerk für stückige Schrotte einsetzbar.

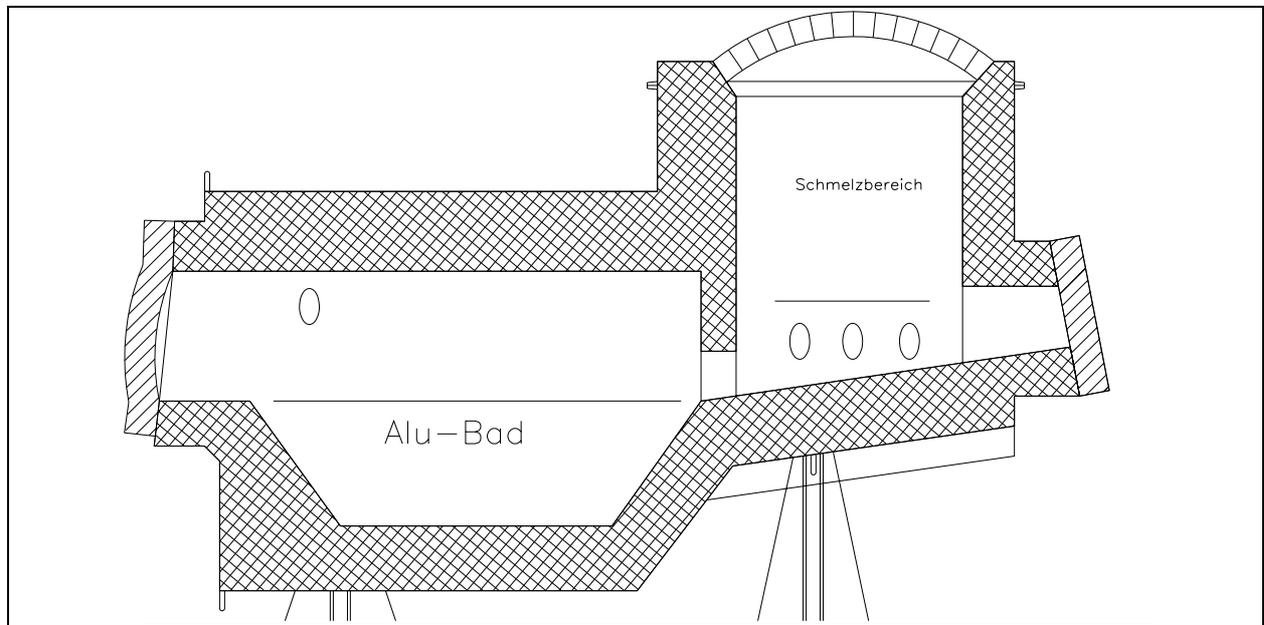


Abbildung 4-11: Kombiniertes Warmhalte- und Schmelzofen Jasper WSO 5000 im Längsschnitt /68/

4.6 Herd- und Wannöfen

Beim Herdofen ist der Raum für das Schmelzbad wannenförmig und wird deshalb auch als Wannöfen bezeichnet. Die Beheizung erfolgt bei Leichtmetall mit Öl- oder Erdgasbrennern. In Herd- und Wannöfen können mit Öl verunreinigte Metalle und Schrotte aufgeschmolzen werden. Oftmals werden Wannöfen zum Warmhalten und Aufbereiten der Legierung eingesetzt. Die Energieeffizienz ist beim Aufschmelzen, wegen des schlechten Wärmetransfers der Brenner auf das Schmelzmaterial, mit 700 – 1 200 kWh_{th}/t_{Al} relativ hoch.

Der spezifische Energieverbrauch zum Warmhalten und Aufbereiten beträgt ca. 200 bis 240 kWh_{th}/t_{Al} /23/. Die Abgase haben am Ofenausstritt eine Temperatur von ca. 800 °C und sind relativ sauber (abhängig vom eingesetzten Material), so dass eine Abwärmenutzung möglich ist. Im Folgenden ist ein Wannöfen dargestellt.

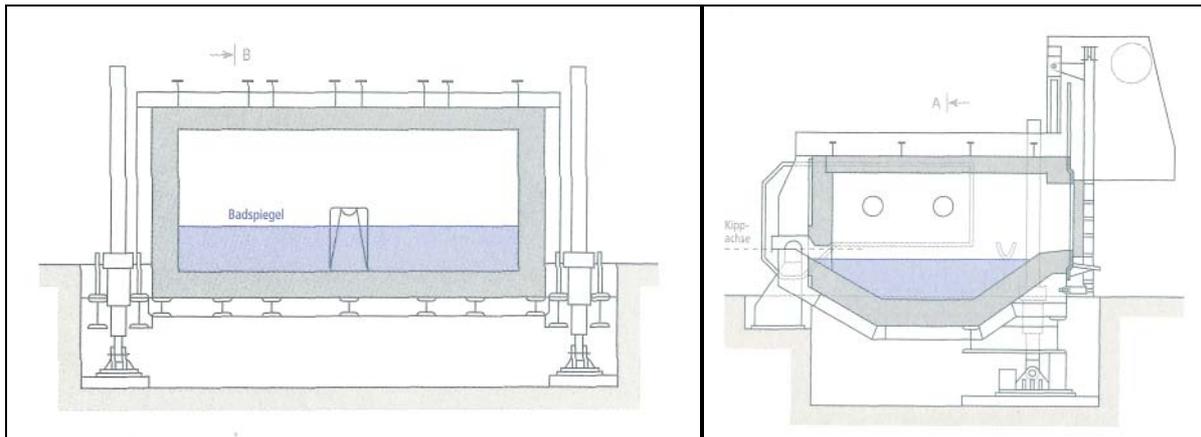


Abbildung 4-12: Darstellung eines Wannenofens in Quer- und Längsschnitt /23/

Um die Energieeffizienz zu steigern, werden bei größeren Herdöfen (über 10 t Kapazität) Rekuperatorbrenner und hoch isolierendes Feuerfestmaterial eingesetzt. Eine weitere Möglichkeit den Erdgasverbrauch bei Herdöfen zu reduzieren, ist ein regeneratives System. Dabei wird die Wärme des Abgases zur Frischluftvorwärmung genutzt. Um die starke Oxidbildung des Aluminumschrottes beim Einschmelzen zu verhindern, wird Salz (NaCl, KCl) zugegeben.

Ein anderer Ansatz der Reduzierung des Brennstoffverbrauchs geht auf den Einsatz von Sauerstoff-Brennern (Oxi-Brenner) zurück. Diese Brenner nutzen hoch mit Sauerstoff angereicherte Luft. Dadurch wird der hohe Anteil des inerten Stickstoffs reduziert und muss somit nicht miterwärmt werden.

Über einen erfolgreich betriebenen energiesparenden Herdwagenofen wird in einem Konzept von Strohenger berichtet /20/. Es sieht zur Ofenoptimierung folgende Ansatzpunkte vor:

- Minimierung der Abstrahlverluste durch gutes Isolieren
- Minimierung der Wärmespeichermasse
- Verwendung vorgewärmter Verbrennungsluft
- Wärmerückgewinnung aus den Rauchgasen

Hierdurch resultiert eine mögliche Rückgewinnung von bis zu 75 % der eingesetzten Energie. Der spezifische Energieeinsatz entspricht damit nahezu dem eines Tunnelofens. Zu beachten ist jedoch, dass die abgegebene Warmluft nicht vollständig in dem angeschlossenen Trocknersystem genutzt werden kann.

4.7 Zwei-Kammeröfen

Zwei-Kammeröfen werden zum Einschmelzen von Aluminiumschrotten ohne Salzzusatz genutzt.

Technische Merkmale sind:

- Schrottkammer
- indirekt beheizte Schrottkammer
- unterstöchiometrisch betriebener Zusatzbrenner

Heizkammer:

- direkte Beheizung über Regenerativ-Brenner
- integrierte Verbrennung von Schwelgasen

Sonstige Merkmale:

- geringe Chargerverluste (Minimierung der Türöffnungszeiten)
- induktives Umwälzen zwischen den Kammern
- geringe Abgastemperaturen (200 °C)
- hohe Schmelzausbeute
- geringer spez. Schmelzenergieaufwand (ca. 530 kWh_{th}/t_{Al} inkl. Chargerverluste)
- geringe Warmhalteleistung 630 kW bei 60 t Badinhalt
- Wirkungsgrad

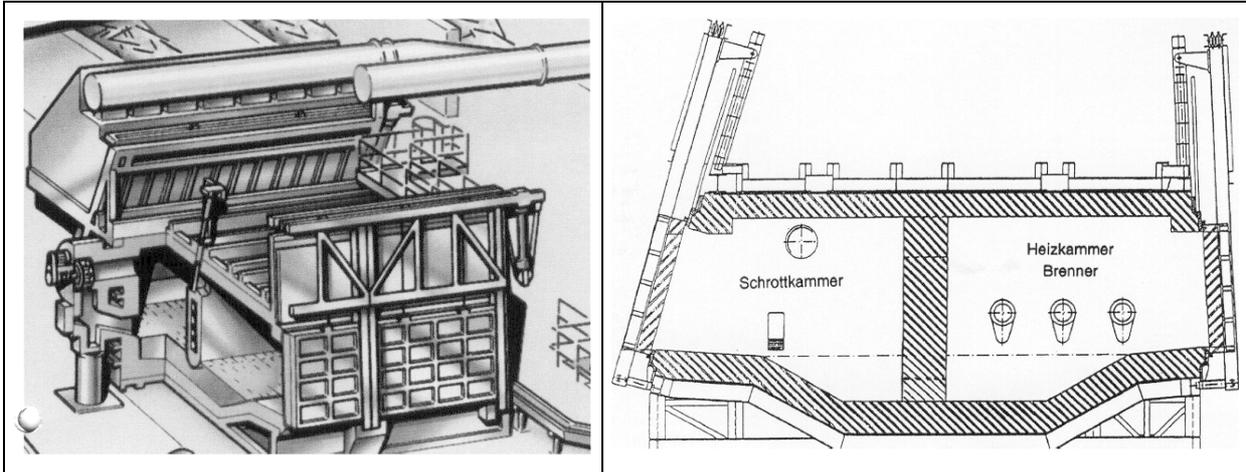


Abbildung 4-13: Zweikammerschmelzofen /13/

Eine Weiterentwicklung des Zwei-Kammer-Schmelzofens ist der 3-Kammer-Schmelzofen mit integrierter Pyrolyse zur wirtschaftlichen und umweltfreundlichen Aufarbeitung von stark kontaminiertem Aluminiumschrott /26/.

4.8 Drehtrommelöfen

Dieser Ofen wird mit Gas oder Öl betrieben und besteht aus einer waagrecht liegenden Trommel, die langsam um ihre Längsachse rotiert. Es gibt starre und kippbare Konstruktionen. Er eignet sich besonders zum Umschmelzen von Aluminiumschrott, Spänen und klein gestückeltem Material, wobei das Aluminiummaterial unter einer Salzdecke eingeschmolzen wird. Die zwei Aufgaben des Salzes bestehen darin, die eingetragenen und entstehenden Oxide sowie die sonstigen anorganischen Beimengungen des Schrottes aufzunehmen und das flüssige Metall vor weiterer Oxidation zu schützen.

Nachteilig ist der Anfall an großen Salzschlacke-Mengen, die nur mühselig aufbereitet werden können. Die Feuerungsabgase treten aus der dem Brenner gegenüber liegenden Seite aus und erwärmen somit die Trommel. Sobald das Material geschmolzen ist, wird die Trommel langsamer gedreht, so dass die Schmelze kontinuierlich mit der Trommelinnenwand in Berührung kommt. Trommelöfen sind hauptsächlich für eine Kapazität von 10 t bis 20 t konstruiert. Die benötigte Schmelzleistung der Brenner bringt eine hohe Abgastemperatur mit sich.

Deshalb werden hier Rekuperatorbrenner und Regenerativsysteme sowie Oxi-Brenner wirtschaftlich eingesetzt. Dadurch erreichen die Schmelzöfen thermische Wirkungsgrade von 50 % bis 65 %. Der Erdgasverbrauch liegt bei starren Drehtrommelöfen mit Oxi-Brennern bei 520 – 570 kWh_{th}/t_{Al}, dagegen mit konventionellen Brennern bei 1 230 – 1 300 kWh_{th}/t_{Al} Metall. Kippbare Drehtrommelöfen verbrauchen ca. 750 kWh_{th}/t_{Al}.

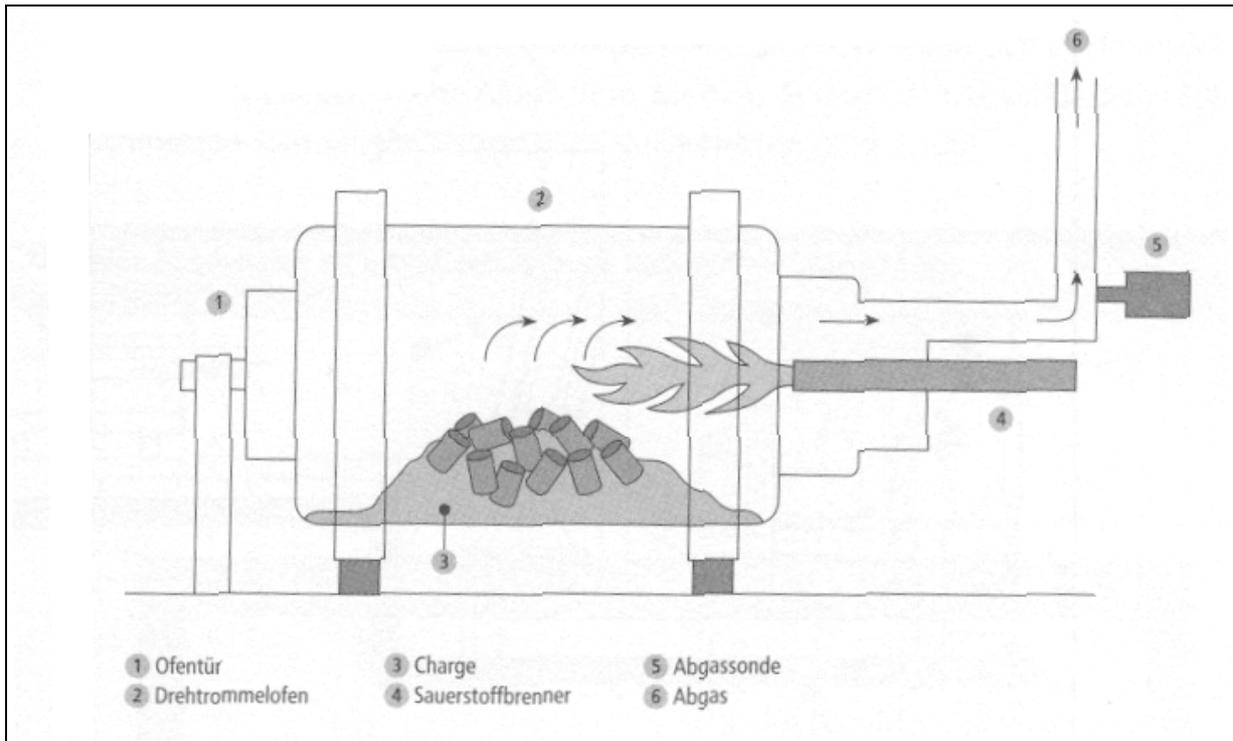


Abbildung 4-14: Drehtrommelofen mit Sauerstoffbrenner /23/

Ein erheblicher Nachteil des Drehtrommelofens ist die kurze Standzeit der Feuerfestauskleidung der Trommel von max. 2 Jahren. Wegen der Stückigkeit des Schrottes und der Drehbewegung entsteht ein starker und kontinuierlicher Abrieb der Feuerfestauskleidung /33/.

Eine wichtige Energiesparmaßnahme ist, den Kaltluftbrenner durch einen Sauerstoffbrenner zu ersetzen. Der Feuerungstechnische Wirkungsgrad erhöht sich erheblich (von ca. 40 % auf ca. 80 %). Nicht unerheblich ist allerdings der Abbrand mit 10 % des Materialeinsatzes im Gegensatz zu den sonst genannten ca. 5 %.

4.9 Brenner für öl-/gasbeheizte Öfen

Im Industrieofenbereich finden folgende Brennersysteme und -anlagen Verwendung:

Tabelle 4-4: Brennersysteme im Industrieofenbereich

Verbrennungsluftsystem	Brennerart
Kaltluft: 20 °C – 25 °C	Ein-/Zweistufen-Brenner
	Modulierender Brenner
	Low-NO _x -Brenner
	Sauerstoffbrenner
Warmluft: 200 °C – 400 °C	Rekuperatorbrenner
	Mantelrohrbrenner
Heißluft: > 400 °C	Alternierende Regeneratorbrenner
	Kontinuierliche Regeneratorbrenner
	Flox-Brenner

Tabelle 4-5: Brennersysteme und deren Einsatzkriterien

Auswahlkriterium	Kaltluftbrenner 1-stufig	Kaltluftbrenner 2-stufig / modulierend	Sauerstoffbrenner	Warmluftbrenner Rekuperator	Warmluftbrenner Mantelrohr / Rekuperator	Warmluftbrenner Regenerator
Einsatzbereich	Aufschmelzen	Warmhalten	Aufschmelzen	Aufschmelzen	Warmhalten	Aufschmelzen
Ofentyp	Tiegel-, Wannen- und Schacht- schmelzöfen	Tiegel-, Wannen- und Schacht- schmelzöfen	Wannen- und Drehtrommel- öfen	Tiegel-, Wannen- und Schacht- schmelzöfen	Tiegel	Tiegel-, Wannen- und Schacht- schmelzöfen
Kosten	Gering	gering	hoch	mittel	mittel	hoch
feuerungs- technischer Wirkungsgrad	50-60%	50-65%	85-90%	70-80%	70-80%	80-90%
Verbrennungs- temperaturen	1200 °C	1200 °C	2000 °C	1300 °C	1300 °C	1300 °C
Abgastempe- raturen	600-1000 °C	600-1000 °C	600-1000 °C	400-600 °C	400-600 °C	150-300 °C

4.9.1 Kaltluftbrenner

Das Brenngas und die Verbrennungsluft werden dem Brenner getrennt zugeführt, dort durch Strömung und Diffusion vermischt und gezündet. Kaltluftbrenner, wie aus Abbildung 4-15 ersichtlich, haben bei Abgastemperaturen von ca. 1 000°C einen feuerungstechnischen Wirkungsgrad von 50 – 60 %.

4.9.1.1 Einstufenbrenner

Der Einstufenbrenner arbeitet im Ein-Aus-Betrieb. Hierbei wird ein konstanter Brennstoffmassenstrom verbrannt, der in etwa der Nennleistung des Schmelzofens entspricht.

4.9.1.2 Zweistufenbrenner

Der Zweistufenbrenner arbeitet hingegen mit einer Dreipunktregelung: Aus – Teillast – Volllast. Die Feuerungsleistung des Brenners lässt sich hierdurch besser an den tatsächlichen Wärmebedarf des Ofens, der zwischen Aufschmelzen und Warmhalten stark variiert, anpassen. Dadurch wird der Ofenwirkungsgrad verbessert.

4.9.1.3 Modulierender Brenner

Modulierende Brenner verwenden einen stetigen Regler zur kontinuierlichen Leistungseinstellung. Der Brenner passt sich gleitend dem Wärmebedarf des Ofens an. Dies führt zu einer längeren Laufzeit des Brenners und zu weniger Brennerstarts, was wiederum zu einer weiteren Steigerung des Ofenwirkungsgrades führt.

4.9.1.4 Low-NO_x-Brenner

Bei einer Verbrennung treten in der Flamme Temperaturen von bis zu 2 000 °C auf. Mit zunehmender Temperatur (> 1 600 °C) steigt die thermische NO_x-Bildung deutlich an. Neben der Temperatur sind die Verweilzeit der Verbrennungsprodukte im Hochtemperaturbereich sowie das Sauerstoffangebot für die NO_x-Bildung von Bedeutung. Zur Senkung der Flammentemperatur und der daraus folgenden Minderung des NO_x-Ausstoßes wurde der Low-NO_x-Brenner entwickelt. Die Abkühlung der Flamme resultiert durch mehrstufige Verbrennung und eine Abgabe von Energie an die Ofenatmosphäre durch Abgasrezirkulation.

4.9.1.5 Sauerstoffbrenner

Bei einer Verbrennung nimmt Stickstoff als Inertgas nicht aktiv an der Verbrennung teil. Trotzdem muss es mit aufgeheizt werden und erhöht so die Abgasmenge und den notwendigen Energieeinsatz. Sauerstoffbrenner verwenden als Verbrennungsgas reinen Sauerstoff, der aber erst durch eine vorherige kostenintensive Luftzerlegung gewonnen werden muss. Dadurch reduziert sich der Abgasstrom und es werden wesentlich höhere Temperaturen erreicht. So entstehen höhere Schmelzleistungen und kürzere Aufschmelzzeiten. Weitere positive Aspekte des Sauerstoffbrenners sind die Brennstoffeinsparung und die geringere Geräuschentwicklung.

Der energetische Vorteil wird in der Abbildung 4-15 der Feuerungstechnischen Wirkungsgrade sichtbar. Bei ansonsten gleichen Werten im Vergleich zu Brennern, die mit Luft arbeiten, werden Werte von über 80 % erreicht.

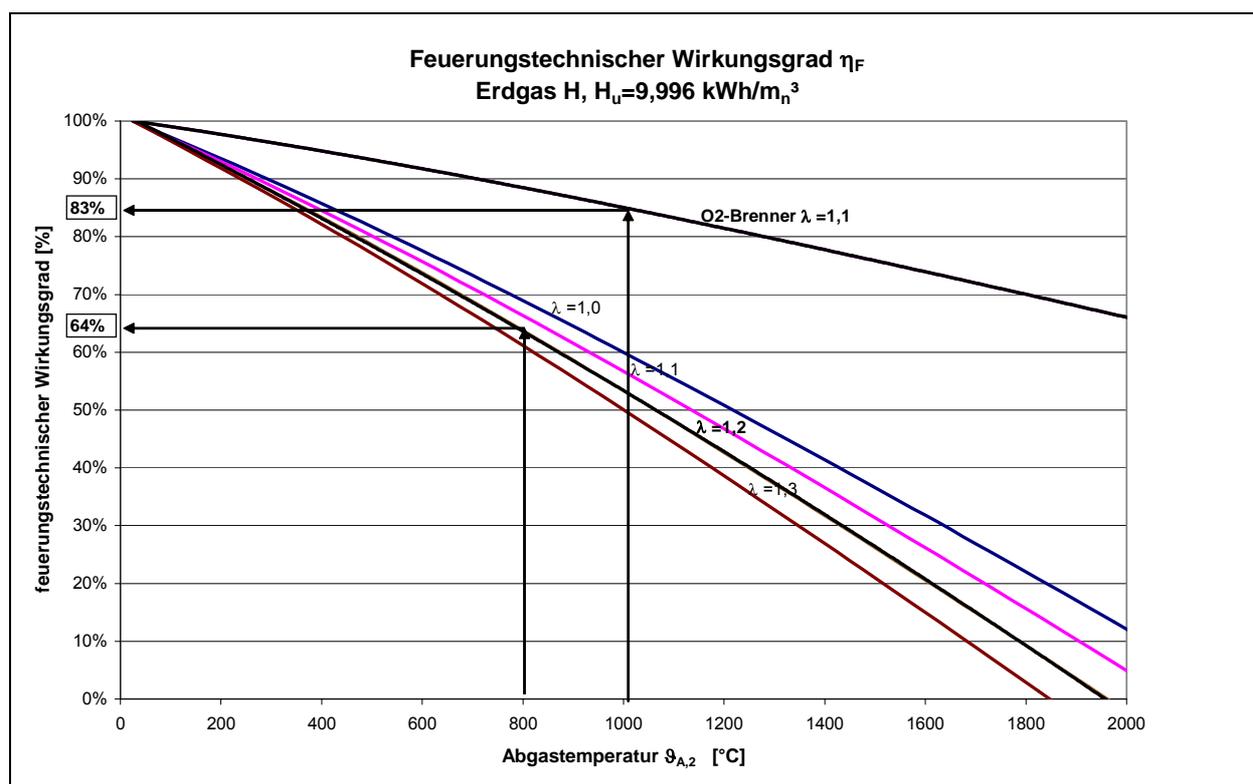


Abbildung 4-15: Feuerungstechnischer Wirkungsgrad η_F

Dargestellt sind Beispiele des Feuerungstechnischen Wirkungsgrads η_F von Brennern in Schmelzöfen:

Luftbrenner: Austrittstemperatur $\vartheta_{A,2}$ =Ofen 800 °C, Luftzahl $\lambda=1,2$,
Feuerungstechnischer Wirkungsgrad $\eta_F=64$ %

O₂-Brenner: Austrittstemperatur $\vartheta_{A,2}$ =Ofen 1 050 °C, Luftzahl $\lambda=1,1$,
Feuerungstechnischer Wirkungsgrad $\eta_F=83$ %)

4.9.2 Warmluftbrenner

Durch Vorwärmung der Verbrennungsluft und gleichzeitige Abkühlung der Abgase auf eine Abgastemperatur $\vartheta_{A,2}$ lässt sich der Feuerungstechnische Wirkungsgrad wesentlich steigern.

Die Verbrennungsluft wird über Abgas/Verbrennungsluft-Wärmetauscher erwärmt. Werden Trennflächen-Wärmetauscher eingesetzt, so spricht man von Rekuperatoren. Die Verbrennungsluft wird vor der Verbrennung in den Warmluftbrennern auf ca. 400 °C erwärmt.

Wichtige Einflussfaktoren auf die Verbrennungslufttemperatur sind:

- Ofenaustrittstemperatur $\vartheta_{A,1}$
- Wirkungsgrad des Wärmerückgewinners Φ_{WRG}

Die Ofenaustrittstemperatur wird z.B. durch Vorwärmung des Schmelzgutes abgesenkt.

Je höher der Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung, desto mehr Energie lässt sich aus dem Abgas zurück gewinnen und desto besser werden die Feuerungstechnischen Wirkungsgrade. dies hat jedoch seine physikalischen Grenzen. Das Abgas kann aber nie vollständig auf das Temperaturniveau der Verbrennungsluft abgekühlt werden, da die Verbrennungsluftmenge nur ca. 75 % der Abgasmenge ausmacht.

Die Flammentemperatur und damit auch die NO_x -Emissionen hängen wesentlich von der Temperatur der Brennluft ab. Daher kommt bei hoher Brennlufttemperatur der NO_x -Reduzierung eine noch bedeutendere Rolle zu. Hier liegt ein hauptsächliches Anwendungsgebiet für Brenner die nach dem FLOX[®]-Prinzip (flammlose Oxidation) arbeiten. Bei diesen Brennern findet der Ausbrand homogen im gesamten Ofenraum statt, was zu einer gleichmäßigen Verbrennungstemperatur ohne ausgeprägte Temperaturspitzen führt.

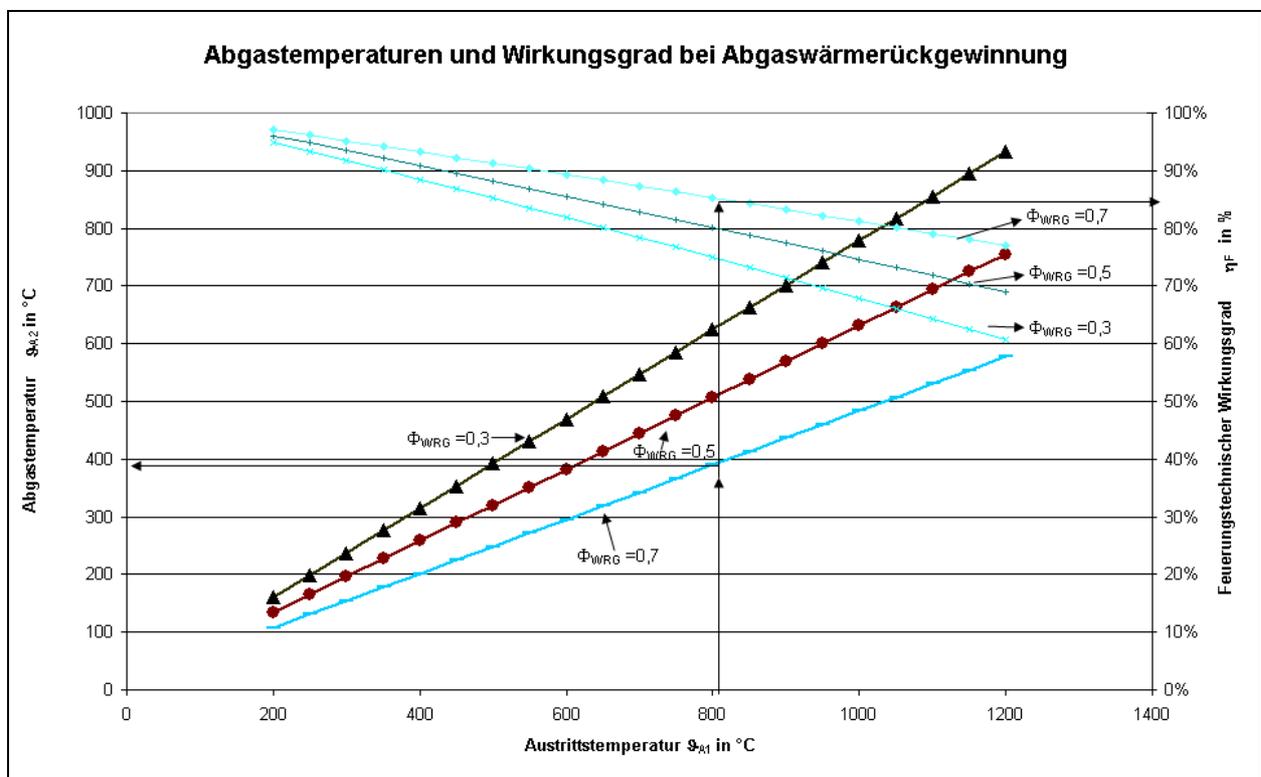


Abbildung 4-16: Abgastemperatur und feuerungstechnischer Wirkungsgrad für unterschiedliche Wirkungsgrade (30, 50 und 70 %) einer Abgaswärmerückgewinnung (Erdgas H, $\lambda = 1,2$)

Das Potenzial eines Abgaswärmetauschers bei einer Ofenaustrittstemperatur von ca. 800 °C und einem Wirkungsgrad des Wärmerückgewinners von 70 % zeigt Abbildung 4-16. Die Abgastemperatur sinkt auf ca. 400 °C und der feuerungstechnische Wirkungsgrad steigt auf ca. 86 %.

4.9.2.1 Rekuperatorbrenner

Im Rekuperatorbrenner wird das heiße Abgas durch das Brennergehäuse aus dem Ofenraum abgeführt und überträgt dabei im Wärmetauscherprinzip (Doppelrohr) einen Teil seiner Wärme auf die zugeführte kalte Verbrennungsluft. Dabei wird die Luft auf ca. 500 °C aufgeheizt und der Gasverbrauch kann so um etwa 30 % reduziert werden. Dies setzt einen dichten Brennraum voraus, der eine weitgehend vollständige Abführung der Abgase zurück durch den Brenner gewährleistet.

Dieser Brennertyp ist nur für saubere Ofenatmosphären geeignet, weil Staub die im Brenner integrierten Wärmetauscherflächen zusetzt und so einen höheren Reinigungsaufwand zur Folge hat. Im Vergleich zu metallischen Rekuperatoren machen keramische Werkstoffe die Anwendung auch bei höheren Temperaturen möglich. Diese sind aber empfindlicher gegen mechanische Beanspruchung. Da der Rekuperatorbrenner durch die vorgewärmte Verbrennungsluft wesentlich höhere Prozesstemperaturen erreicht, ist eine hohe Flammenaustrittsgeschwindigkeit von bis zu 120 m/s, die eine Rezirkulation der Abgase bewirkt, Voraussetzung für die erforderliche NO_x -Reduzierung.

Rekuperatoren lassen sich auch fest im Abgasrohr installieren. Allerdings lassen sich durch im Brenner integrierte rekuperative Wärmetauscher höhere Luftvorwärmtemperaturen erreichen, da keine Leitungsverluste auftreten. Den Schnitt eines Rekuperatorbrenners und eine Abbildung eines Zentralrekuperators zeigt Abbildung 4-17.

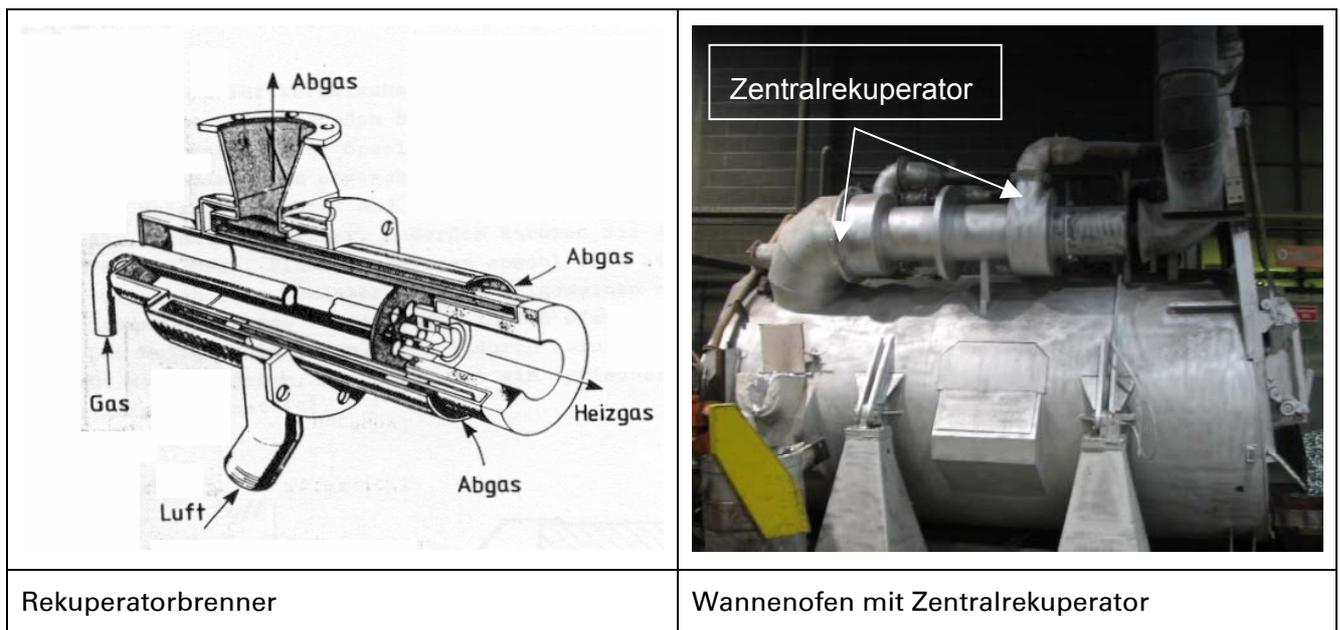


Abbildung 4-17: Rekuperatorbrenner in einer Schnittdarstellung und Wannenofen mit Zentralrekuperator

4.9.2.2 Mantelrohrbrenner

Mantelrohrbrenner werden zur indirekten Beheizung eingesetzt, d.h. wenn die Verbrennungsgase nicht mit dem Gut oder der Ofenatmosphäre in Kontakt kommen sollen oder keine Konvektion erwünscht ist. Sie bestehen aus einem gasdichten, geschlossenen Mantelrohr mit innen liegendem Brenner. Zur Verbesserung der Energieeffizienz wurden rezirkulierende Mantelrohrbrenner mit Rekuperatoren entwickelt, die eine Luftvorwärmung auf bis zu 800 °C möglich machen und die Abgastemperaturen auf ca. 500 °C senken. Keramische Strahlrohre, die zwar empfindlicher gegen mechanische Beanspruchung sind, weisen im Vergleich zu metallischen Strahlrohren eine wesentlich höhere Abstrahlleistung und Lebensdauer auf.

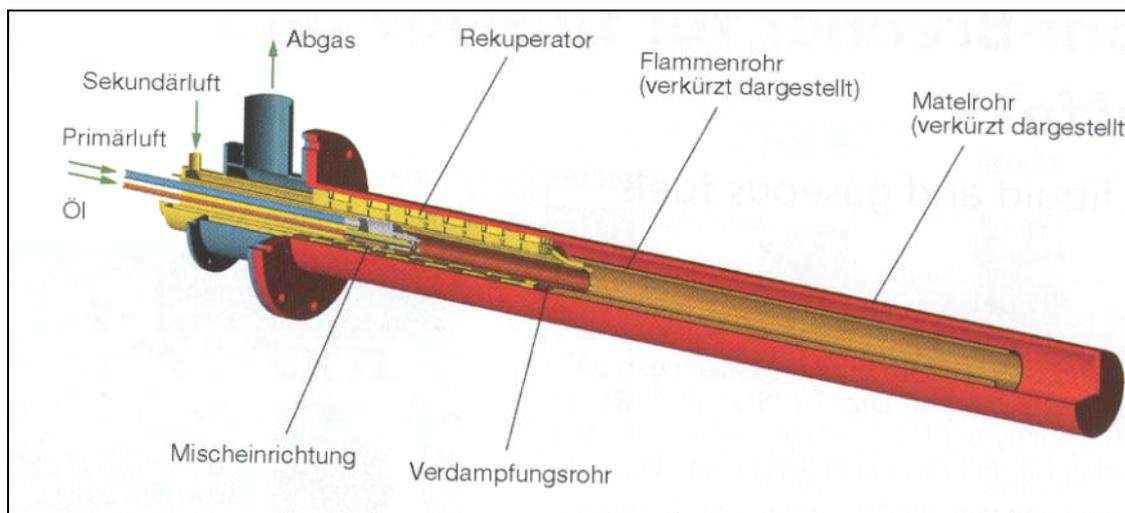


Abbildung 4-18: Schnitt durch ein Mantelstrahlrohr mit Rekuperator /15/

Materialbedingt müssen Rekuperatoren bei hohen Ofentemperaturen oftmals durch Verbrennungsluftbeimischung gekühlt werden und sind so in ihrer Leistung beschränkt. Der Wirkungsgrad wird dadurch verschlechtert.

4.9.3 Regenerator- oder Heißluftbrenner

Regeneratorbrenner

In Regeneratoren wird die Wärme über ein Speichermaterial, das sich regeneriert, übertragen. Eingesetzt werden Feststoff-Speichermaterialien wie Stahl, Keramik und Graphit-Kugeln. Je nach Bauart des Regenerators werden diese entweder alternierend oder kontinuierlich von heißen Abgasen und kühler Verbrennungsluft durchflossen.

Der spezifische Energieverbrauch ist ähnlich gering wie der von Sauerstoffbrenner-Anlagen. Das System ist jedoch kostengünstiger und umweltschonender, da keine Luftzerlegung nötig ist. Während die Leistungsfähigkeit von Rekuperatoren beschränkt ist, sind Regeneratoren für höhere Temperaturbereiche und Brennerleistungen einsetzbar und erzielen damit wesentlich höhere Wirkungsgrade. Die Rückwärmgrade betragen 70 % bis 90 %. Hierdurch lässt sich die Luft auf ca. 1 000 °C erwärmen. Die Feuerungstechnischen Wirkungsgrade sind nach Abbildung 4-16 größer 80 %. Wegen der höheren Luftvorwärmung im Vergleich zu den Rekuperatoren werden auch höhere Verbrennungstemperaturen erzielt, die die thermische NO_x -Bildung fördern. Daher müssen Brenner zum Einsatz kommen, die nach dem Low- NO_x - oder FLOX[®]-Prinzip arbeiten /51/.

Alternierende Regeneratorbrenner

Bei alternierend betriebenen Regeneratorbrennern wechselt der Brenner-/Regeneratorbetrieb taktweise unter Nennlast, d.h. im Aufheizbetrieb des einen Regenerators wird über den Brenner ca. 80 % des Verbrennungsproduktes (Abgas) des anderen Brenners abgesaugt. Die restlichen 20 % des Abgases werden zur Erhaltung des thermischen Gleichgewichtes über einen zusätzlichen Abgasstutzen abgeführt, der auch dem Notbetrieb eines Regenerators bei Reinigung oder Wartung dient. Somit steigt die Verfügbarkeit des Ofens auf über 98 %. Brennerleistungen von bis zu 3 600 kW pro Paar bringen bei Ofentemperaturen von 900 – 1 050 °C in der Regel 25 – 45 % Energieeinsparung. Der pulsierende Durchflussrichtungswechsel in den Regeneratoren wird mit Hilfe von Klappen durchgeführt (4-Wege-Steuerung), wie aus Abbildung 4-19 ersichtlich wird.

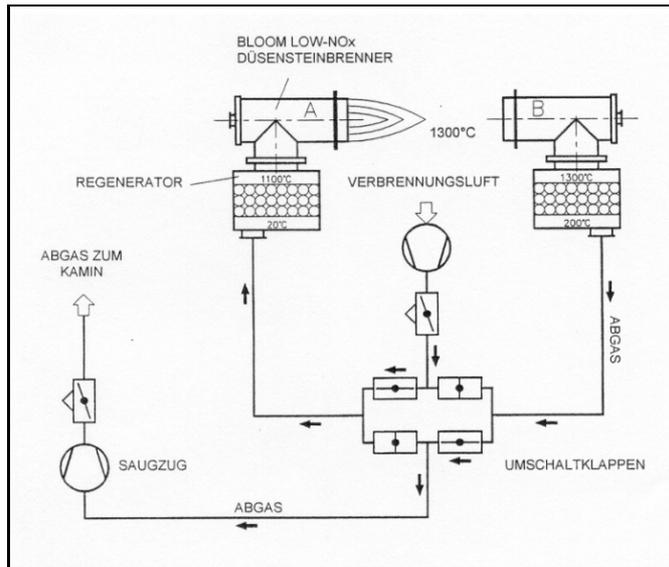


Abbildung 4-19: Regeneratorbrenner mit alternierend durchflossenen Speichern /10/

Alternierend betriebene Regeneratoren können auch als Zentralregenerator mit einer beliebigen Anzahl von Brennern betrieben werden, wobei das Abgas und die Heißluft in getrennten Kanälen fließen. Die Brenner sind nicht den Regeneratoren zugeordnet und werden nicht von Abgas durchströmt. Das Abgas wird an der verfahrenstechnisch „richtigen“ Stelle des Ofens entnommen und über eine separate Leitung den Regeneratoren zugeführt.

Anwendungsgebiete sind Öfen, bei denen aufgrund der Verfahrenstechnik das Abgas unabhängig vom Einsatzort der Brenner abgeführt werden soll, oder Öfen, bei denen mehrere und/oder unterschiedliche Brenntypen verwendet werden.

Diese beiden Regeneratorbrennersysteme eignen sich auch für den Einsatz in korrosiven und staubigen Ofenatmosphären. Um einem Anstieg des Energieverbrauchs wegen Verschmutzung durch Staub und der daraus resultierenden Verkleinerung der Wärmetauscheroberfläche vorzubeugen, muss die Wärmetauscherfüllung regelmäßig gereinigt oder ausgetauscht werden.

Kontinuierliche Regeneratorbrenner

Beim Drehbett-Regenerator-Brenner /26/ sind die beiden Regeneratoren und Brenner eines klassischen Regeneratorbrenners physikalisch in einem drehenden Regenerator mit einem Brenner zusammengefasst. Das Regenerator-Unterteil ist feststehend. Das drehbare Oberteil ist in Kammern eingeteilt, durch die das kalte Abgas bzw. die kalte Verbrennungsluft strömt. Die Abdichtung des Unterteils zu dem Oberteil übernehmen Dichtleisten aus Stahl bzw. aus Keramik. Der Wärmetauscherfüllung des Regenerator-Oberteils wird durch die Drehbewegung des Oberteils heißes Abgas zugeführt und die Wärmeenergie abgespeichert. Bei der weiteren Drehbewegung des Oberteils kommen die Segmente in den Bereich der kalten Verbrennungsluft, die durch die in der Wärmetauscherfüllung gespeicherte Wärmeenergie erhitzt wird. Die Wärmetauscherfüllung erkaltet und wird wieder mit heißem Abgas beaufschlagt und so erneut erhitzt.

Wie beim alternierend betriebenen Regeneratorbrenner ist auch hier ein zusätzlicher separater Abgasstutzen notwendig, um das thermische Gleichgewicht des Brenners zu halten und dem Notbetrieb des Regenerators mit Kaltluft zu dienen. Brennerleistungen bis 1 000 kW sind realisierbar.

Den Aufbau eines Drehbett-Regenerators zeigt Abbildung 4-20.

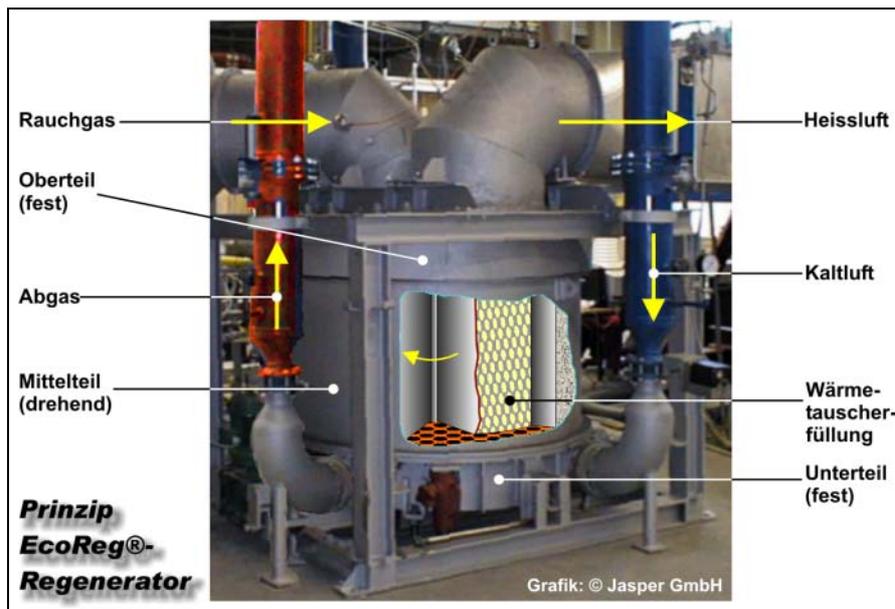


Abbildung 4-20: Schema des Drehbett-Regenerators ECOREG® /26/

Der Aufbau und die Funktion des Drehbett-Regenerators-TYP ECOREG® – ist im Prinzip gleich dem des Drehbett-Regenerator-Brenners.

Der Regenerator, für große Leistungen ausgelegt, steht neben dem Ofen, saugt das Abgas vollständig ab und versorgt eine beliebige Anzahl und/oder Bauart von Brennern kontinuierlich mit heißer Verbrennungsluft. Die Brenner sind nicht dem Regenerator zugeordnet und werden nicht vom Abgas durchströmt. Die Einteilung in unabhängige kontinuierlich geregelte Heizzonen ist möglich. Das Abgas kann an beliebigen Stellen des Ofens entnommen werden und wird über eine separate Leitung dem Drehbett-Regenerator zugeführt. Eine zentrale Wärmerückgewinnung auch von mehreren Ofenanlagen ist möglich.

Der Regenerationsgrad ist durchschnittlich größer als 80 % bezogen auf die Eintrittstemperatur des Abgases, d.h. bei einer Eintrittstemperatur von ca. 1 200 °C beträgt die mittlere Verbrennungslufttemperatur ca. 1 000 °C und die den Drehbett-Regenerator verlassenden Abgase haben je nach Auslegung eine Temperatur von 150 °C – 220 °C.

4.10 Ofenauskleidung und Wärmedämmung

Die Auskleidung eines Schmelzofens erfüllt folgende Funktionen:

- kein Kontakt des flüssigen Aluminiums mit der Metallwand
- Schutz gegen Abrieb
- Wärmeschutz

Die Auskleidung des Ofens beeinflusst maßgeblich die Wärmeverluste des Systems und damit den Energieverbrauch. Materialien mit geringer Wärmeleitfähigkeit und Dichte tragen dazu bei, dass Temperaturen an der Außenwand des Aluminium-Schmelzofens lediglich 60 °C betragen.

Darüber hinaus ist darauf zu achten, dass das flüssige Aluminium die Bestandteile der gängigen feuerfesten Materialien nicht angreifen kann. Dies wird durch Zugabe von verschiedenen Elementen angestrebt, die eine Infiltration des Aluminiums verhindern sollen /69/.

Auskleidung feuerfest

Der in Abbildung 4-21 skizzierte Aufbau der Feuerfestauskleidung hat sich in vielen Aluminiumschmelzöfen durchgesetzt.

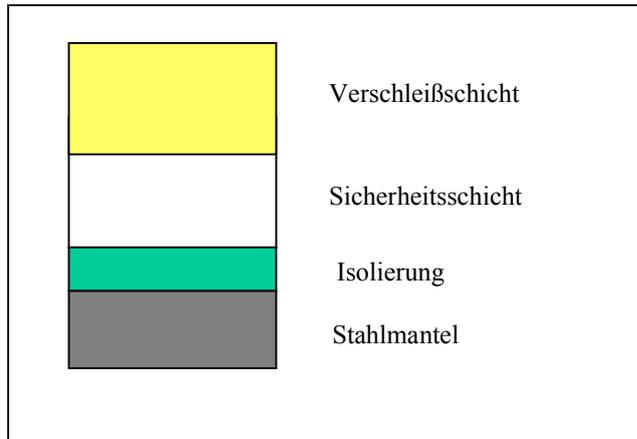


Abbildung 4-21: Aufbau einer typischen Feuerfestauskleidung

Für die innere Schicht wird in aller Regel Feuerbeton (z.B. Aluminiumoxid, Tonerde) verwendet. Strasser u.a. geben eine Übersicht über die Anforderungen und Eigenschaften unterschiedlicher Feuerfestbetone. Wichtigstes Einsatzkriterium ist die Verhinderung von Korundbildung und die Abriebfestigkeit.

Aufgrund des Einsatzes aggressiv wirkender Salze, der Metallströmung und der Temperaturschwankungen kann die Verschleißschicht abnutzen oder reißen. Spätestens in der Sicherheitsschicht sollte es zu einer Erstarrung von flüssig eindringendem Aluminium kommen, damit keine Beschädigung der Isolierung erfolgt.

Die Isolierung besteht häufig aus dem Material Microtherm[®]/8/. Wichtig bei der Wahl des Verschleißfutters sind die Benetzung abweisenden Eigenschaften gegenüber Aluminium. Abkratzmittel sind nur vorsichtig einzusetzen, weil Alkalisalze das Feuerfestmaterial schädigen können.

In /8/9/ werden thermisch optimale mikroporöse Wärmedämmstoffe vorgestellt.

Tabelle 4-6: Materialien für die Ofenzustellung und deren Eigenschaften

Material	Dichte	spez. Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit 20 °C	Wärmeleitfähigkeit 800 °C
	[kg/m ³]	[kJ/kgK]	[W/mK]	[W/mK]
Dichter Feuerbeton /21/	2 000 – 2 500	950	1,4 – 3,5	1,4 – 3,5
Feuerleichtstein	800 – 1 200	950	0,18 – 0,6	0,2 – 0,85
Isolierplatten /23/24/	200 – 300	1 000	0,02 – 0,05	0,025 – 0,08

Oberflächentemperaturen

An typischen Tiegelöfen werden Oberflächentemperaturen von 120 – 150 °C gemessen. Dies deutet auf eine geringe Dämmung oder Verschlechterung der Dämmwirkung durch den Ofenbetrieb hin. Mit gut gedämmter und Feuerfestauskleidung sind Oberflächentemperaturen von ca. 70 °C bei 25 °C Umgebungstemperatur zu erwarten. Bei der Auslegung muss drauf geachtet werden, dass der Taupunkt (bei Erdgasbrennern ca. 60 °C) in der Wand nicht unterschritten wird.

Abdeckung

Ist die Abdeckung z.B. eines Tiegelofens offen, so wird von der Oberfläche des Schmelzbades Wärme direkt an die Umgebung übertragen. Der Wärmeverlustkoeffizient beträgt ca. $30 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Ein offener Tiegel mit 570 mm Öffnungsdurchmesser (ca. 1 m^2) verliert somit bei einer Flüssigkeitstemperatur von 730 °C ca. 24 kW Wärme je m^2 Öffnungsfläche.

Durch einen einfachen Stahldeckel verringert sich der Wärmeverlustkoeffizient auf ca. $15 \text{ W/m}^2\text{K}$, d.h. der Verlust wird auf ca. 12 kW/m^2 reduziert. Ist der Deckel mit feuerfestem Dämmmaterial verkleidet, sinkt der Verlust auf ca. 6 kW/m^2 .

Eine Abdeckung der Tiegel bzw. eine Minimierung der betrieblich bedingten Öffnungszeiten von Kammeröfen ist daher unbedingt zu empfehlen.

4.11 Schmelzverluste

Der so genannte Abbrand wird durch Krätzebildung infolge Reaktion mit der Luft oder den Feuerfestmaterialien des Ofens verursacht. Weiterhin entsteht Krätze durch Verunreinigungen des Einsatzmaterialies, so dass saubere Materialien zu einem verringerten Krätzeanfall führen.

Es existieren folgende Möglichkeiten, das Ausmaß der Oxid- und Krätzebildung niedrig zu halten. Diese nachstehenden Empfehlungen helfen gleichfalls, den Energieverbrauch zu reduzieren:

- Einhaltung möglichst niedriger, metallurgisch noch vertretbarer Temperaturen. Dadurch werden die chemischen Reaktionen mit der Schmelze verlangsamt, so dass weniger Krätze entsteht.
- Kurze Haltezeiten auf der Abgießtemperatur.
- Anpassungen der Feuerfeststoffe für Ofenauskleidungen an die eingesetzten Legierungen.
- Verwendung von Abdeckmitteln (z.B. Salze), um die Atmosphäre von der Schmelze fernzuhalten.
- Der Einfluss der Mittel auf das Feuerfestmaterial muss berücksichtigt werden.
- Herstellung einer reduzierenden Atmosphäre oder Inertgasspülung.
- Sachgemäße Lagerung, möglichst kein Transport und keine Rücklaufmateriallagerung im Freien.

5 Elektrische beheizte Tiegel und Rinnenöfen

In den letzten Jahrzehnten hat der Einsatz elektrischer Energie als Prozessenergie in der Metall erzeugenden und Metall verarbeitenden Industrie deutlich zugenommen. Die Vorteile von elektrischer Energie bei Schmelzprozessen gegenüber Schmelzverfahren mittels Verbrennung sind vor allem verfahrenstechnischer und metallurgischer Natur:

- Prozesswärmebereitstellung ohne direkte Flammeneinwirkung vor Ort
- reduzierte Schadstoffbelastung am Anwendungsort
- hohe Wärmeleistungsdichten
- hohe Qualität bei Legierungen, da keine Verunreinigungen durch unerwünschte Abgasbestandteile eintreten
- problemloser und schneller Legierungswechsel
- Reduzierung von Abbrandverlusten (infolge genauer Temperaturführung und geringer Kontaktoberflächen zu Luft oder Rauchgasen)
- Hoher Wirkungsgrad der Energiewandlung elektrischer Energie in Wärme am Einsatzort und geringerer Endenergiebedarf am Einsatzort als bei der Nutzung fossiler Brennstoffe.
- einfache Bedienung, leichte Automatisierungsmöglichkeit

Induktiv beheizte Öfen haben darüber hinaus folgende Eigenschaften:

- gute örtliche und zeitliche Dosierbarkeit der Energiezufuhr
- präzise Einstellung der Prozessparameter (z.B. Temperatur)
- gezielte Erwärmung innerhalb des Gutes
- Einsatz von (Abfall-)Spänen als Rohstoff

Als Nachteile elektrischer Schmelzverfahren gegenüber etwa gasbeheizten Schmelzaggregaten gelten:

- relativ hohe direkte Kosten der eingesetzten elektrischen Energie im Vergleich zu den Energiekosten fossiler Energieträger
- höherer Primärenergieverbrauch und damit höhere CO₂-Emissionen bei Betrachtung der gesamten Energieeinsatzkette.

Neben der verfahrenstechnischen Beurteilung sind für Betreiber von Schmelzeinrichtungen vor allem betriebswirtschaftliche Faktoren wie niedrige Investitions- und Betriebskosten und weitere nicht unmittelbar monetäre Bewertungskriterien wie Betriebsflexibilität, Produktivität, Verfügbarkeit und Umweltverträglichkeit von hoher Bedeutung.

In Tabelle 5-1 (u.a. nach /62/) wird eine qualitative Aufstellung dieser Kriterien gegenüber brennstoffbefeueten Prozesswärmeverfahren vorgenommen:

Zusammenfassung

Elektrische Energie kann im Vergleich zu fossilen Brennstoffen bei Schmelz- und Gießprozessen wesentlich zweckmäßiger und gezielter eingesetzt werden.

Der Nachteil des höheren Energiepreises kann häufig durch geringere Betriebskosten und höhere Betriebsflexibilität ausgeglichen werden.

Tabelle 5-1: Qualitative Bewertung des Einsatzes induktiver Prozesswärme

	Bewertung induktiver Prozesswärme
Produktivität	++
Flexibilität	++
Verfügbarkeit	++
Stoffrecycling	++
Investitionskosten	+
Betriebskosten	+
• direkte Energiekosten	--
• Wartungskosten	++
• Instandhaltungskosten	+

5.1 Elektrisch widerstandsbeheizte Tiegelöfen

Man unterscheidet zwei Arten von elektrisch widerstandsbeheizten Öfen:

- direkte Widerstandserwärmung
- indirekte Widerstandserwärmung

5.1.1 Die direkte Widerstandserwärmung

Bei der direkten Widerstandserwärmung wird das Heizgut durch direkten Stromdurchgang erwärmt. Dies erfolgt meistens mit Netzfrequenz und setzt ein elektrisch leitendes Material voraus.

Vorteile der direkten Widerstandserwärmung

Die **ausschlaggebenden Vorteile** für den wirtschaftlichen Einsatz der direkt widerstandsbeheizten Öfen sind in erster Linie die verfahrenstechnischen, metallurgischen und energetischen Gesichtspunkte wie:

- schnelle Produktionsbereitschaft
- gleichmäßige Erwärmung
- keine Randentkohlung
- geringer Platzbedarf
- hoher Nutzungsgrad

Für Industrieöfen ist jedoch die indirekte Widerstandserwärmung aufgrund der größeren Bandbreite der Einsatzmöglichkeiten gebräuchlicher geworden (z.B. Unabhängigkeit vom Schmelzgut) /39/46/.

5.1.2 Die indirekte Widerstandserwärmung

Elektrisch widerstandsbeheizte Tiegelöfen werden in den Gießereien in erster Linie zum Warmhalten von Aluminium und Buntmetallen eingesetzt.

Die indirekte Widerstandserwärmung liegt vor, wenn die Wärme außerhalb des zu erwärmenden Gutes in Heizleitern erzeugt wird und durch Wärmestrahlung, Konvektion, Wärmeleitung auf den zu erwärmenden Körper übertragen wird. Die drahtförmigen Heizelemente sind rund um den Tiegel angebracht und ermöglichen eine gleichmäßige Temperaturverteilung. Sie bestehen aus Materialien wie Nickel-Chrom- oder Eisen-Chrom-Aluminium-Legierungen /39/.

5.1.3 Vorteile von widerstandsbeizten Öfen

Die wichtigsten technischen und wirtschaftliche Vorteile nach /39/ sind:

- einsetzbar für nahezu alle Werkstoffen
- Zuverlässigkeit und einfache Konstruktion
- einfache Bedienung durch Steuereinrichtungen
- großer Freiheitsgrad in der Geometrie des Werkstückes
- hohe Betriebssicherheit und hohe Zuverlässigkeit
- keine Emissionen durch Brennstoffgase
- sehr gute Regelbarkeit

5.1.4 Nachteile von widerstandsbeizten Öfen

Den wirtschaftlichen Vorteilen stehen Nachteile gegenüber, die bei der Einsatzplanung indirekt widerstandsbeheizter Ofen berücksichtigt werden müssen:

- die installierbare Leistung ist begrenzt
- evtl. Erhöhung der elektrischen Anschlussleitung erforderlich
- hohe Stromkosten
- Einführung eines Lastmanagements notwendig

5.1.5 Steuerung widerstandsbeheizter Ofen

Gesteuert werden die Schmelz- und Warmhalteöfen mittels Schütz- oder Thyristorsteuerung. Es existieren mehrere nahezu gleichwertige Steuerungen auf dem Markt. Die Temperaturregung ist sehr genau und schnell möglich.

5.1.6 Vergleich von widerstands- und brennstoffbeheizten Tiegelöfen

In Tabelle 5-2 ist eine Gegenüberstellung von elektrisch- und brennstoffbeheizten Tiegelöfen zu sehen. Anhand der signifikanten Größen wird ein grober Vergleich zu brennstoffbeheizten Tiegelöfen gezogen.

Tabelle 5-2: Vergleich von elektrisch- und brennstoffbeheizten Tiegelöfen gleicher Schmelzkapazität (180 kg)

	Einheit	Elektrisch beheizte Tiegelöfen	Brennstoffbeheizte Tiegelöfen
Anschaffungskosten		gering	moderat
Betriebssicherheit		hoch	mittel
Energieverbrauch		gering	mittel
Standzeit der Tiegelisolierung		lang	moderat
Materialverlust durch Abbrand	[%]	1 – 1,5	1,5 – 3
Verbrauch Warmhalten	[kW/h]	3	16
Verbrauch Schmelzen	[kWh _{th} /t _{Al}]	400 – 500	1 000 – 1 300
Temperatur Schwankungen in der Schmelze		gering	mittel
Schmelzleistung	[t/h]	0,120	0,220
Investitionskosten	€	gering	mittel
Energiekosten	€/t _{AL}	0,032	0,039
Wirkungsgrad		hoch	gering – mittel

5.2 Prinzip induktiver Elektroschmelzverfahren

Große Verbreitung haben in der Gießereiindustrie induktive Elektroschmelzverfahren, vor allem die so genannten elektrisch-induktiven Verfahren gewonnen. Während elektrisch widerstandsbeheizte Öfen vorwiegend zum Warmhalten eingesetzt werden, finden induktiv beheizte Öfen beim gezielten Aufschmelzen Verwendung. Dabei werden die physikalischen Prinzipien der Induktion angewandt, also der Übertragung von Energie mittels elektromagnetischer Wechselfelder von einem elektrischen Primärkreis auf einen Sekundärkreis (Transformatorprinzip).

Der in einer äußeren Spule fließende elektrische Wechselstrom induziert direkt im metallischen Einsatzgut (= Leiter) Wirbelströme mit hoher Stromstärke. Die ohmschen Verluste dieser Ströme führen zu einer unmittelbaren Erwärmung des Einsatzgutes bzw. zu dessen Schmelzen und Überhitzen.

Diese elektrischen Wirbelströme sind aber auch die Ursache für den Aufbau sekundärer Magnetfelder, die im Feldinnern (Ofenzentrum) das primäre Magnetfeld abschwächen. Die induzierten Ströme werden daher in den Außenbereich der Schmelze verdrängt („Skinneffekt“).

Man unterscheidet bei induktiven Schmelzverfahren im Wesentlichen zwischen zwei Ofentypen, dem Induktions-Tiegelofen, bei dem die induktive Erwärmung ohne Eisenkern erfolgt, und dem Induktions-Rinnenofen, bei dem ein Eisenjoch das Magnetfeld führt. Beide Ofentypen können zum Einschmelzen, Überhitzen und Warmhalten von Eisen- und NE-Metallen eingesetzt werden, unterscheiden sich jedoch deutlich in ihrer Funktionalität und auch dem Energieverbrauch.

5.2.1 Der Induktions-Tiegelofen

Nachfolgende Abbildung verdeutlicht den Aufbau eines Induktions-Tiegelofens:

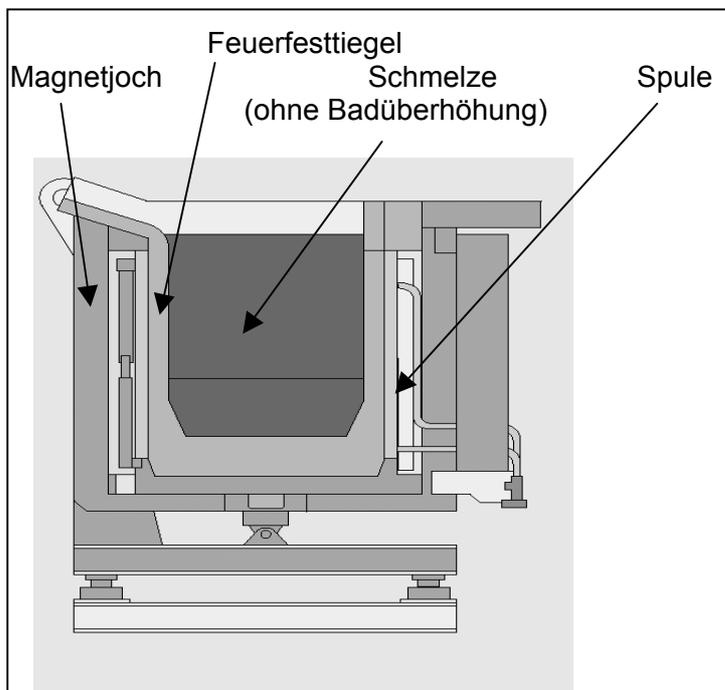


Abbildung 5-1: Schnitt durch einen Induktions-Tiegelofen /71/

Eine mehrwindige wassergekühlte Induktionsspule umschließt und stützt den Tiegel. Zur Führung des magnetischen Flusses außerhalb der Induktionsspule dienen Blechpakete (Magnetjoch). Diese schirmen auch das tragende Stahlgerüst vor unzulässiger induktiver Erwärmung durch Streufelder ab. Das Schmelzgut im Innern wirkt wie die kurzgeschlossene Sekundärwicklung eines Transformators.

Der die Schmelze umfassende zylindrische Tiegel besteht aus feuerfester keramischer Stampfmasse; damit beschränkt sich die joulesche Wärmeentwicklung auf das Strom führende metallische Einsatzgut. Der Ofen ist kippbar gelagert und über eine Ofenschauze entleerbar.

Die elektromagnetische Induktion verursacht im Flüssigmetall im Wesentlichen radial nach innen gerichteten Kräfte und als Folge davon im gesamten Tiegel walzenförmige Badbewegungen.

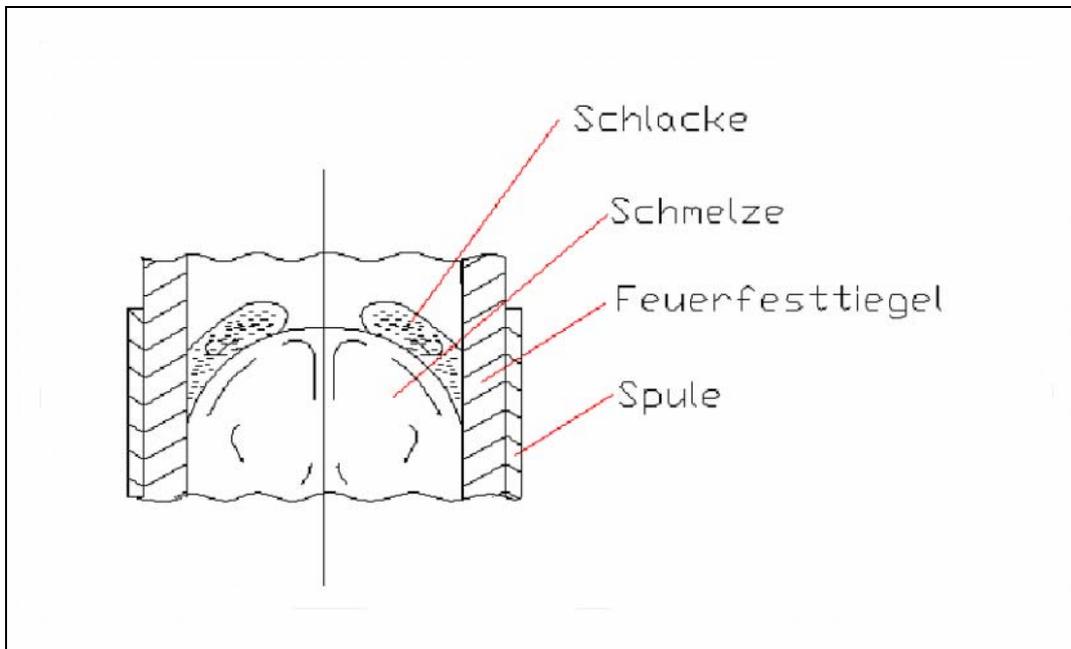


Abbildung 5-2: Badbewegung im Induktions-Tiegelofen

Andererseits fördert sie das Einrühren von Legierungszusätzen und von spezifisch leichten Einsatzstoffen wie z.B. Metallspänen. Nachteilig ist, dass diese Strömung den konvektiven Wärmetransport an die Tiegelnähe erhöht und sich daher größere Wärmeverluste einstellen. Weiterhin erhöht sich der Futterverschleiß der Feuerfestauskleidung.

Die Umlaufströmungen haben eine „reinigende“ Wirkung, da z.B. spezifisch leichtere Verunreinigungen an die Oberfläche getrieben werden und sich in Wandnähe sammeln können (siehe Abbildung 5-2).

Die Arbeitsfrequenz von Induktions-Tiegelöfen

Industriell eingesetzte Induktions-Tiegelöfen arbeiten entweder mit Netzfrequenz (50 Hz) oder mit (variabler) Mittelfrequenz (> 50 Hz bis 10 000 Hz).

Im Netzfrequenz-Tiegelofen (NFTO) muss ein Überschwappen der Schmelze durch Begrenzung der Ofenleistung verhindert werden. Dies verlängert die Schmelzzeiten und erhöht infolge der zeitproportionalen Wärmeverluste den spezifischen Energieverbrauch.

Obwohl der Mittelfrequenz-Tiegelofen (MFTO) deutlich höhere Leistungsdichten aufweist als der NFTO, kann die Badbewegung mittels variabler Frequenz so angepasst werden, dass eine ausreichende Rührwirkung ohne Überschwappen erreicht wird. Die höhere Leistungsdichte beim MFTO bewirkt kürzere Schmelzzeiten und damit geringere Wärmeverluste pro geschmolzener Tonne Flüssigmetall. MFTO haben daher trotz Umrichterverluste von 3 – 5 % einen besseren Gesamtwirkungsgrad als NFTO.

Die bisher in der Praxis realisierten Leistungsdichten beim Schmelzen von NE-Metallen liegen bei folgenden Werten /61/:

Tabelle 5-3: Realisierte Leistungsdichten beim Schmelzen von NE-Metallen

NE-Metall	max. Leistungsdichte [$\text{kWh}_{\text{th}}/\text{t}$]	optimale Frequenz [Hz]
Aluminium	500	90 bis 150
Kupfer/ Kupferlegierungen	400	60 bis 120

Die theoretische Gesamtenergie zur Bereitstellung geschmolzener Metalle resultiert aus der Erwärmung bis zum Schmelzpunkt, der Schmelzenergie und der Überhitzungsenergie bis zum Erreichen der Endtemperatur (siehe Abbildung 5-3). Auf Grund multipler Energieverluste liegt der tatsächliche Energieverbrauch deutlich höher als die physikalischen Mindestwerte dies erfordern.

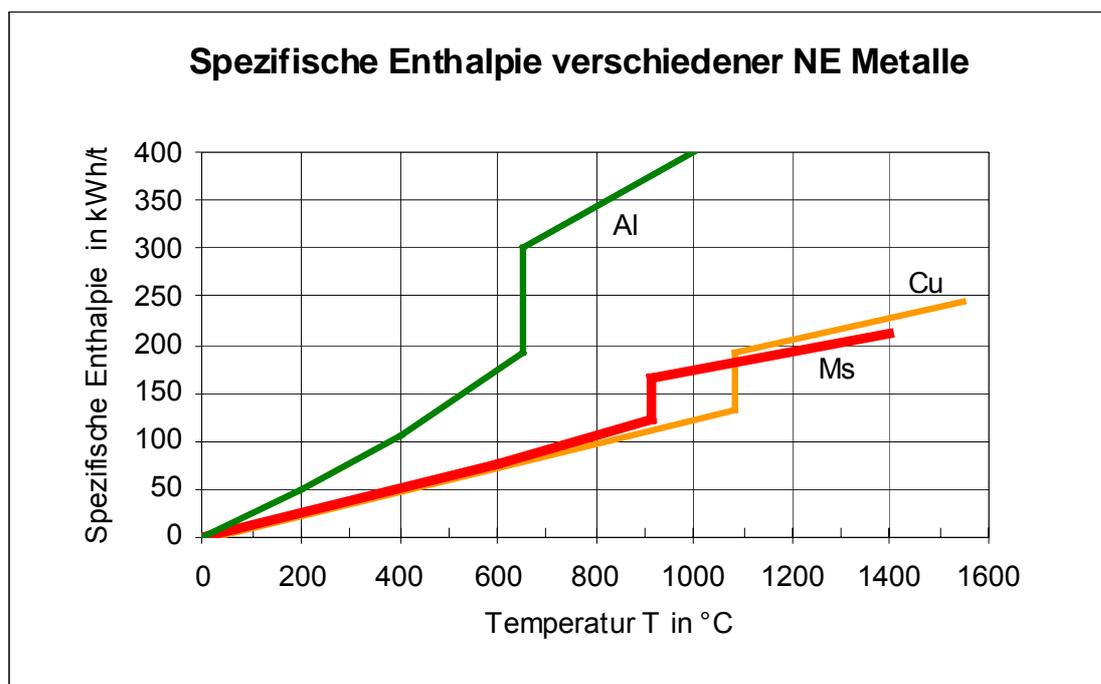


Abbildung 5-3: Die spezifische Enthalpie der NE-Metalle Kupfer, Messing und Aluminium, in Abhängigkeit von der Temperatur

Wirkungsgrad im Induktions-Tiegelofen

Der Wirkungsgrad eines Induktionsofens setzt sich zusammen aus dem elektrischen Wirkungsgrad (Effizienz der Einbringung der elektrischen Energie in das Schmelzgut) und dem thermischen Wirkungsgrad (Wärmeverluste der Schmelze über Wände, Abstrahlung etc.). Dieser Gesamtwirkungsgrad einschließlich aller elektrischen und thermischen Wirkungsgrade liegt für Eisen-Metalle im Bereich von 65 bis 75 %, bei NE-Metallen im Bereich von 55 bis 70 % (siehe Abbildung 5-4).

Er ist über die Materialeigenschaften hinaus auch von der Beschickungsart und dem Ofenbetrieb abhängig.

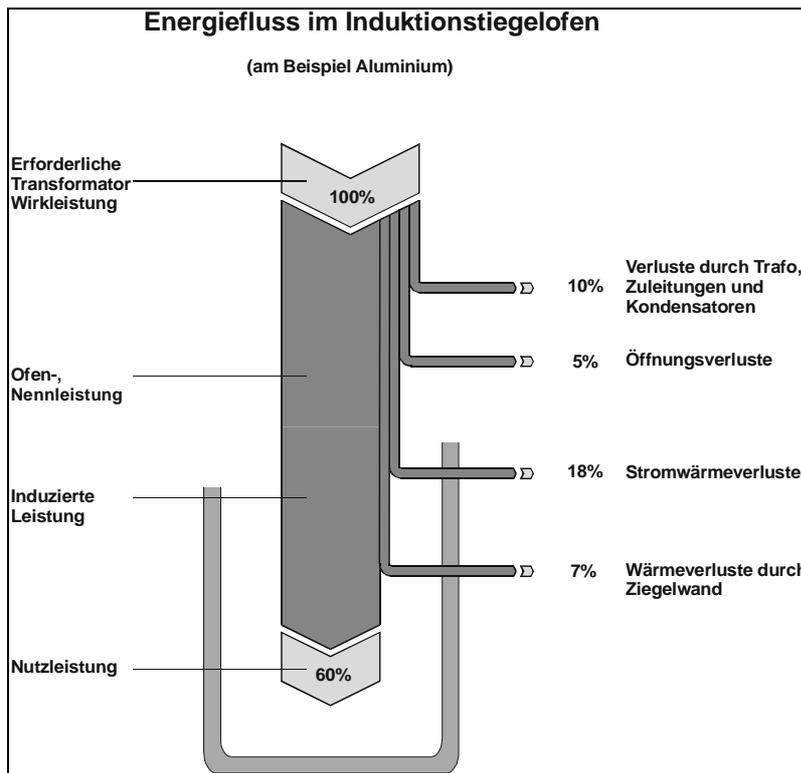


Abbildung 5-4: Energiefluss im Induktions-Tiegelofen

5.2.2 Der Induktions-Rinnenofen

Der Induktions-Rinnenofen besteht aus einem unbeheizten, mit Feuerfestmaterial aus gekleidetem Ofengefäß, das den überwiegenden Anteil der Schmelze aufnimmt. Von unten sind ein oder zwei Induktoren (siehe Abb.) angeflanscht, die jeweils aus einer Spule, einem geschlossenen Eisenkern und einem Kühlmantel bestehen. Beim Induktions-Rinnenofen wird die induzierte Wärmeleistung überwiegend in die schmale Rinne eingebracht und von dort dem Schmelzgut im Ofengefäß mittels elektromagnetischer Kraftwirkungen bzw. Wärmekonvektion zugeführt.

Im Ofengefäß selbst sind die Strömungsbewegungen deutlich geringer als bei Induktions-Tiegelöfen. Da die Rinne den elektrischen „Sekundärkreis“ bildet, muss diese immer mit geschmolzenem Material gefüllt sein. Der Ofen wird also nie vollständig entleert, man hält auch in Stillstandzeiten mit entsprechendem Energieaufwand einen Metallsumpf in der flüssigen Phase.

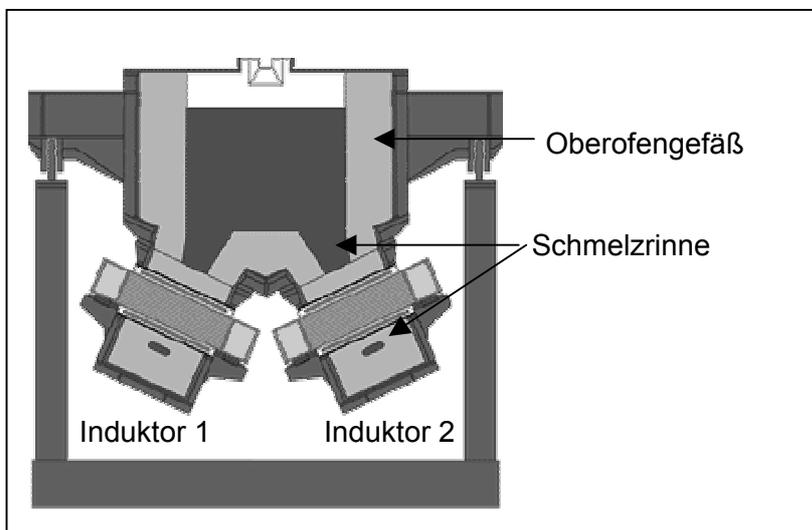


Abbildung 5-5: Induktions-Rinnenofen mit zwei seitlich angeflanschten Induktoren

Die Leistungen gegenwärtig lieferbarer Induktoren liegen je nach Baugröße der Schmelzöfen z.B. für Kupfer zwischen 100 und 2 500 kW. Somit ist die maximale Ofenleistung deutlich niedriger als die von Induktions-Tiegelöfen.

Wirkungsgrad im Induktions-Rinnenofen

Beim Induktions- Rinnenofen entstehen in der Induktorspule, dem Gehäuse und dem Kühlmantel elektrische Verluste. Unvermeidbar sind thermische Verluste im Oberofen. Die Wirkungsgrade für das Schmelzen von Eisen liegen bei 95 %, für NE-Metalle zwischen 70 und 90 %. Für Aluminium ist nachstehend das zugehörige Energieflussdiagramm dargestellt:

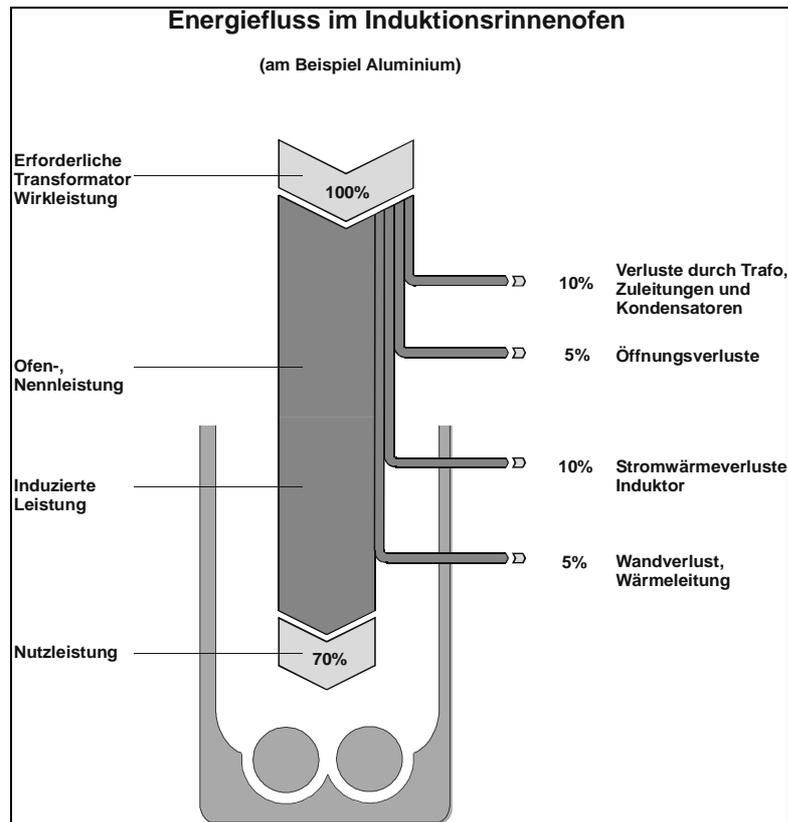


Abbildung 5-6: Energiefluss im Induktions-Rinnenofen

Vergleich von Tiegel- und Rinnenöfen

Im Rahmen dieser Studie zu Elektroschmelzverfahren wurden Messungen in einem Gießereibetrieb vorgenommen, der ausschließlich Messinghalbzeuge produziert. Daher werden in Tabelle 5-4 die verfahrenstechnischen und energetischen Eigenschaften beider Ofentypen speziell für Kupfer und Kupferlegierungen gegenübergestellt /62/.

Tabelle 5-4: Vergleich Induktions-Tiegel mit Induktions-Rinnenofen

Induktions-Tiegelofen	Eigenschaft	Induktions-Rinnenofen
relativ niedrig, ca. 60 – 65 %	Wirkungsgrad	relativ gut, ca. 80 – 85%
hoch, da einfach entleerbar	Flexibilität	gering, da schlecht entleerbar und abschaltbar
270 – 295 kWh/t	Energieverbrauch	200 – 225 kWh/t
hoch	Badbewegung	Oberofen: relativ gering
gut für Späne und Stückgut	Beschickung	gut geeignet für Stückgut und Kathoden
Neuzustellung einfach, geringe Haltbarkeit	Feuerfest	Neuzustellung und Austausch des Induktors einfach Oberofenzustellung aufwändiger, jedoch langlebiger

Induktions-Tiegelofen	Eigenschaft	Induktions-Rinnenofen
mittels Spülsteinen	Entgasung	mittels Spülsteinen
Weniger geeignet wegen geringerem Wirkungsgrad	Warmhalten	sehr gut
sehr gut wegen Ganzentleerung und guter Badbewegung	Legieren	wegen geringerer Badbewegung weniger geeignet
möglich	Ganzentleerung	ungeeignet

Die Vorteile des Induktions-Rinnenofens sind neben dem sehr guten thermischen und dem elektrischen Wirkungsgrad auch die gegenüber dem Induktions-Tiegelofen niedrigeren spezifischen (auf das Fassungsvermögen bezogenen) Anlagenkosten. Allerdings muss die Rinne ständig mit einem Schmelzrest warm gehalten werden. Bei häufigen schmelzfreien Zeiten (Nacht- bzw. Wochenendstillstand) führt das zu einem nennenswerten Energieverbrauch. Daher ist dieser Ofentyp vor allem für den Dauerbetrieb geeignet.

5.2.3 Warmhalteöfen

Warmhalteöfen und Vergießöfen dienen als Puffer zwischen dem diskontinuierlichen Schmelzprozess und dem kontinuierlichen Gießprozess. Als Warmhalteöfen eignet sich prinzipiell sowohl der Induktions-Tiegelofen als auch der Induktions-Rinnenofen. Der Vorteil des Induktions-Rinnenofens liegt wieder in seinem guten elektrischen und thermischen Wirkungsgrad, was sich vor allem im durchgängigen 3-Schichtbetrieb positiv auf den Energieverbrauch auswirkt. Der Induktions-Tiegelofen weist dagegen auch als Warmhalteofen die höhere Flexibilität (Legierungswechsel, vollständiges Entleeren, Kaltlaufen in Stillstandszeiten und gleichzeitige Nutzung als Schmelzaggat) auf. Nachteilig ist hier der höhere spezifische Energieverbrauch.

5.3 Schmelzen von Spänen

Das Schmelzen von Spänen ist eine effiziente Methode zur Ressourcenschonung und Energieeinsparung.

Metallspäne fallen bei der Metallbearbeitung in großen Mengen an und stellen für Gießereien einen kostengünstigen Rohstoff dar. Bei direktem Einsatz dieses Abfallstoffes ohne weitere Vorbehandlung lassen sich beträchtliche Energieeinsparungen gegenüber Primärmessing erreichen.

Das Einschmelzen ist jedoch grundsätzlich schwieriger durchzuführen als etwa bei stückigem Schrott oder Masseln. Die Abbrandverluste im Gießprozess und die spezifischen Energieverbräuche vor Ort sind ebenfalls höher als bei Stückgut. Beides ist auf die Konsistenz und geringe Schüttdichte von Spänen zurückzuführen.

Den Bohr- und Frässpänen haften bis zu 10 Gewichtsprozent der Öl-Wasseremulsionen an. Daher werden solche Späne häufig vor ihrem weiteren Einsatz zentrifugiert und getrocknet. Die bei der Verdunstung entstehenden Kohlenwasserstoffe müssen dann in Nachverbrennungsanlagen bei ca. 900 °C vernichtet werden.

Diese Spänebehandlung verursacht nicht nur Kosten (10 €/t), sondern erfordert auch eine zusätzliche Energiezufuhr. Daher ist es zweckmäßig, Verfahren zu entwickeln, bei denen Späne ohne Vorbehandlung eingesetzt werden können.

Sollen z.B. Messingspäne (Ölgehalt 2 – 4 % und Wassergehalt 3 – 5 %), unbehandelt eingeschmolzen werden, muss die Beschickung so geschehen, dass die Feuchte vor dem Auftreffen auf die Badoberfläche verdunstet bzw. verbrennt. Späneklumpen sind zu vermeiden, da für diese starke Oxidation auftreten und eine gefährliche Brückenbildung („Deckelung“) mit eruptivem Auswurf entstehen kann.

Während des freien Falls der Späne vom Förderzeug zur Schmelzenoberfläche verbrennen die Ölanteile verpuffungsartig und geben große Wärmemengen ab.

Der Induktions-Tiegelofen eignet sich infolge seiner ausgeprägten Badströmungen sehr gut zum Einschmelzen von Spänen. Im oberen, gewölbten Bereich wird die unvermeidliche Krätzeschicht mit der Strömung an die Tiegelwand gedrückt und ermöglicht so ungehindert die Zugabe der leichten Späne mittig in die krätzefreie Schmelze.

Die Erfahrung zeigt, dass sich die Metallverluste im Tiegelofen durch Abbrand im Bereich von ca. 1–3 % bewegen, wohingegen bei Induktions-Rinnenöfen 5 – 6 % Metallverluste veranschlagt werden.

Der spezifische Energieverbrauch zum Schmelzen von (Messing-)Spänen liegt höher als der von stückigem Gut. In der Praxis sind für Öfen größer als 12 t spezifische Energieverbrauchswerte von 270 kWh_{el}/t und für kleinere Öfen (3 – 4 t) 320 kWh_{el}/t üblich /71/.

Weitere Optimierungen lassen sich vor allem durch Verkürzung der Nebenzeiten erreichen. Damit stellt sich mittelbar auch ein Rückgang des spezifischen Energieaufwandes ein.

In Abbildung 5-7 ist als Beispiel für eine solche Neukonstruktion ein so genannter Kombischmelzer zum Einschmelzen von Spänen der Firma Induga GmbH dargestellt. Dieser zurzeit in Erprobung befindliche Schmelzofen verknüpft die Vorteile des Rinnenofens (niedriger spezifischer Energieeinsatz) mit denen des Tiegelofens (Badbewegung). Die Späne werden kontinuierlich in den Ofen chargiert, eingeschmolzen und über einen Auslaufsyphon kontinuierlich an den Warmhalte- oder Gießofen übergeben. Dadurch erspart man sich die Unterbrechung durch den Gießvorgang und die Zeit für den Wiederaufbau der Schmelze.

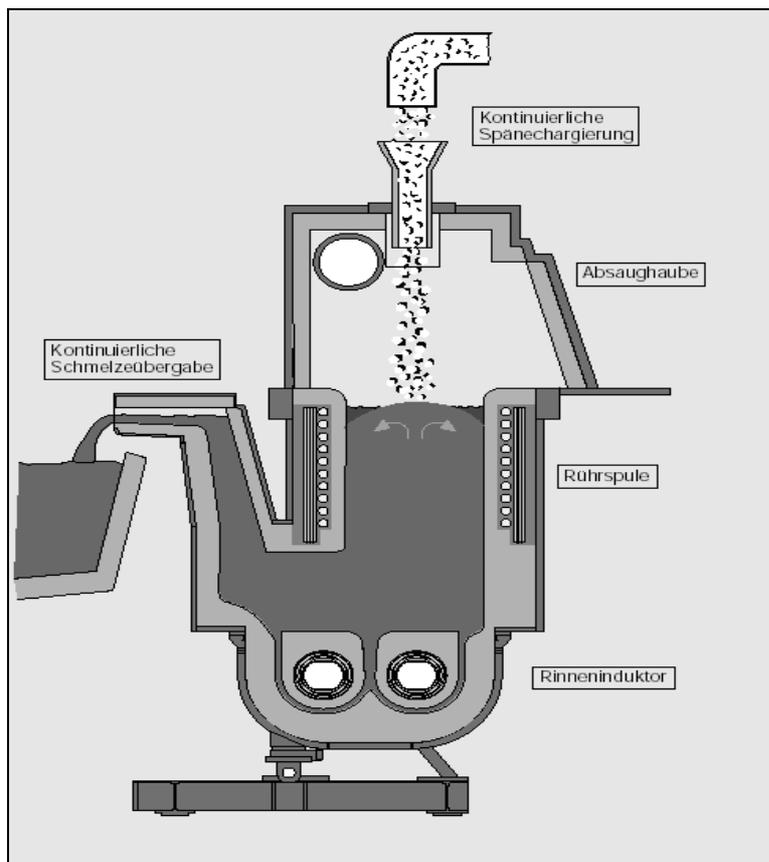


Abbildung 5-7: Schmelzen von Spänen in einem kombinierten Induktions-Tiegelofen/ Rinnenofen (Kombischmelzer) /71/

In einem Prototyp konnten zwischenzeitlich Energieverbrauchswerte (Späne) von 225 – 250 kWh_{el}/t für Messing nachgewiesen werden. Diese Werte liegen deutlich unter den gegenwärtigen spezifischen Verbrauchswerten in Induktions-Tiegelöfen für Späne und stellen daher ein großes Einsparungspotenzial dar.

5.4 Absauganlagen beim Späneschmelzen

Beim Schmelzen von Spänen, denen Öle oder Öl-Wasser-Emulsionen anhängen entstehen Rauchgase mit Temperaturen von einigen hundert bis maximal 1 000 °C. Die Absaughauben sind daher meist keramisch ausgekleidet und wassergekühlt. Die Kühlung ist insbesondere notwendig, um eine Rekombination schädlicher Stoffe wie Kohlenwasserstoffe zu vermeiden. Die Frage nach der möglichen Nutzung der Energie des Kühlwassers bzw. der heißen Abgase wird in Kapitel 7.5 diskutiert.

5.5 Vergleichszahlen zum Energieeinsatz in Elektroschmelzöfen

Der spezifische Energiebedarf für den Schmelzprozess setzt sich bei jeder Energieart aus der Nutzwärme (= aufzubringende Enthalpie, um das Metall bis zum Schmelzpunkt aufzuheizen, zu schmelzen und auf die gewünschte Temperatur zu überhitzen), den energetisch bewerteten Materialverlusten (Abbrand oder Krätze) und den thermischen Verlusten (Kühlwasser, Abwärme im Abgas und Wärmeverluste durch Ofenwände) des Gesamtprozesses zusammen.

In Tabelle 5-5: sind typische mittlere spezifische Energieverbräuche von Elektroschmelzöfen verschiedener Bauart /72/ für verschiedene NE-Metalle zusammengefasst.

Tabelle 5-5: Mittlere spezifische Energieverbräuche von Elektroschmelzöfen verschiedener Bauart /72/

Legierung (Ofenart)	Temperatur der Schmelze [°C]	Schmelzenthalpie und Überhitzungswärme [kWh _{el} /t]	Wirkungsgrad [%]	Tatsächlicher spezifischer Energieverbrauch [kWh _{el} /t]
Kupferlegierungen (Induktionsofen)	1 200	205	60 – 70	290 – 340
Aluminiumlegierungen (Induktionsofen)	750	329	60 – 70	470 – 550
Aluminiumlegierungen (Widerstandsofen)	750	329	60 – 70	440 – 510
Zinklegierungen (Widerstandsofen)	450	84	75 – 80	105 – 110
zum Vergleich Guss-eisen (Induktionsofen)	1 550	368	60 – 70	535 – 620
zum Vergleich Stahl (Lichtbogen)	1 700	395	65 – 75	525 – 610

Für den NE-Metallsektor liegen weitere Detaillierungen vor (Standardwerte Barren) /61/:

Tabelle 5-6: Wirkungsgrade und Energieverbrauchswerte für Induktions-Tiegelöfen

NE-Metall	Mittlerer Wirkungsgrad (%)	spezifischer Energieverbrauch (kWh _{el} /t)
Kupfer	54	385
Messing	63	260
Aluminium	65	530

Tabelle 5-7: Wirkungsgrade und Energieverbrauchswerte für Induktions-Rinnenöfen

NE-Metall	Mittlerer Wirkungsgrad (%)	spezifischer Energieverbrauch (kWh _{el} /t)
Kupfer	88	260
Messing	80	225 *
Aluminium	83	430
Zink	85	100

* davon reiner Schmelzaufwand ohne Nebenzeiten und Materialverluste ca. 195 – 200 kWh_{el}/t /71/

5.6 Staubemissionen und Absaugsysteme

Während der drei Abschnitte eines Elektroschmelzvorganges – Beschickung, Schmelzen und Entleeren – muss ein geeignetes Absaugsystem alle freiwerdenden Stäube und Dämpfe erfassen und einer Staubabscheideanlage zuführen. Bei älteren Anlagen sind seitlich schwenkbare Absaughauben installiert, die im Betrieb hinderlich sein können und daher vom Betriebspersonal bisweilen in ungünstige Absaugpositionen gefahren werden müssen. Vor allem bei (quasi-)kontinuierlicher Beschickung etwa mit Spänen sind die Absaughauben älterer Bauart relativ hoch über dem Ofenrand angebracht, so dass relativ große Absaugmengen erfasst werden müssen. Häufig wird daher die Entstaubungsanlage überdimensional ausgelegt und verbraucht im Betrieb unnötig viel Energie.

Abhilfe lässt sich an neuen Anlagen durch geschlossene Absaughauben (siehe Abbildung 5-7 Kombischmelzer), durch absperrbare Teilstränge bei stillstehenden Anlagen und durch drehzahl-geregelte, dem Bedarf angepasste Ventilatoren erreichen.

5.7 Technologische Weiterentwicklungen zur Reduzierung des Energieverbrauchs bei Elektroschmelzverfahren

Induktionsschmelzöfen gelten im Hinblick auf die Energieumwandlung als ziemlich ausgereift. Trotzdem finden stetig Weiterentwicklungen in kleinen Schritten statt. Das Hauptaugenmerk richtet sich dabei nicht nur auf den Kernprozess, das eigentliche Schmelzen, sondern vor allem auf verfahrens- und prozesstechnische Optimierungen der Hilfs- und Nebenanlagen (siehe Abbildung 5-8). Diese Verbesserungen wirken zumeist indirekt (z.B. durch Verringerung der Nebenzeiten) auf den Energieverbrauch ein.

Zu den energierelevanten Nebenanlagen zählen u.a.:

- die elektrische Energieversorgung mit Hochspannungsschalter, Transformator, Symmetrierung (NF-Technik) oder MF-Umrichter und Kondensatorbatterie
- die Leittechnik mit Prozesssteuerung und Überwachung
- periphere Komponenten wie Gasabsaugung und Rückkühleinrichtungen

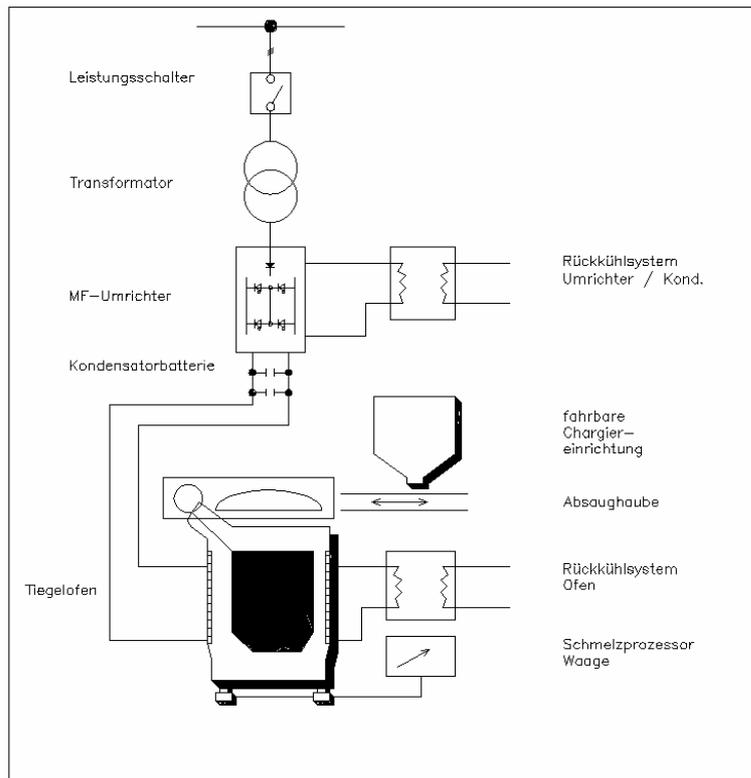


Abbildung 5-8: Schema einer typischen Induktionsofenanlage mit den wichtigsten Nebenanlagen /60/61/

Nachstehend sind einige jüngere Weiterentwicklungen von Fachfirmen und Institutionen zusammengestellt:

Mittlere spezifische Energieverbräuche von Elektroschmelzöfen verschiedener Bauart

Moderne Steuerungen können über den bisherigen Steuerungsumfang hinaus auch Funktionen zur energetischen Verbesserung des Schmelzprozesses anbieten, ohne den Schmelzablauf nachteilig zu beeinflussen (Realisierung z.B. Fa B+M Blumenecker GmbH oder Inductotherm GmbH).

Schmelzprozessoren etwa der Firma ABB führen den gesamten Schmelzprozess, erfassen den Ofeninhalt, berechnen den Energiebedarf und steuern die Energiezufuhr für das Anfahren des Ofens sowie den Schmelz- und Warmhaltebetrieb. Zusätzliche Diagnose- und Trendfunktionen ermöglichen die Analyse und Vorausschau wichtiger energetischer Kennzahlen und Zuverlässigkeitskennzahlen.

Optimierung der Leistungsnutzung

Wie bei allen elektrischen Anlagen strebt man auch bei Induktionsschmelzöfen aus ökonomischen Gründen eine möglichst hohe Nutzungsdauer und möglichst niedrige Leistungsspitzen an. Diese Verbrauchsglättung lässt sich durch kontinuierliches Umschalten einer Stromversorgungseinheit zwischen verschiedenen Öfen erreichen, die dann als Tandemanlagen gefahren werden. Ob und in welcher Richtung diese Technik den Gesamtenergieverbrauch beeinflusst, ist noch nicht eingehend untersucht.

Variable Mittelfrequenztechnik

Bei der Versorgung des Induktionsofens mittels Frequenzumrichter stellen Spule und Kondensatorbatterie einen elektrischen Schwingkreis dar, der mit 70 bis 110 Hz schwingt. Diese Resonanzfrequenz stellt sich selbständig ein und ermöglicht eine einfache Leistungskonstantregelung. Diese Methode mittels Frequenzumrichter erlaubt eine zeitlich und örtlich gut dosierbare Wärmezufuhr. Z.B. kann gezielt von Schmelzbeginn an mit hoher Leistung gefahren und der Schmelzvorgang erheblich verkürzt werden. Damit reduzieren sich die auf die aufgeschmolzene Tonne bezogenen Wärmeverluste und damit der spezifische Energieaufwand.

Mittels dieser Technik kann eindrucksvoll die Reduktion der Schmelzzeiten mit Hilfe eines **Leistungskonstantreglers** von 80 auf 60 min und mittels weiterer **Schaltungsverbesserungen** auf ca. 53 min gezeigt werden.

Das Produkt Power-Focus-Technik ermöglicht bei Tiegelöfen die gezielte Verlagerung der Leistungskonzentration in mehreren Stufen entlang der Spulenhöhe. Damit kann durch eine Verschiebung in den unteren Spulenbereich die Leistungsausnutzung bei teilgefülltem Ofen verbessert werden. Eine Leistungsverschiebung in den oberen Ofenbereich führt zu verstärkter Badbewegung und ist etwa beim Einmischen von Spänen erwünscht.

Umrichterwirkungsgrade

Die Mittelfrequenztechnik mit variabel einstellbaren Arbeitsfrequenzen bietet, wie oben dargestellt, gegenüber der herkömmlichen Netzfrequenztechnik eine verbesserte Wirtschaftlichkeit durch Erhöhung des elektrischen und thermischen Wirkungsgrades und höhere Verfahrensflexibilität. Nachteilig war in der Vergangenheit der unbefriedigende Wirkungsgrad der Umrichter selbst. Inzwischen ist deren elektrischer Wirkungsgrad von 85 % auf nahezu 98 % gestiegen. Damit kann auch diese Komponente als energetisch ausgereift gelten.

In jüngerer Zeit werden auch für Induktions-Rinnenöfen lastgeführte Umrichter eingesetzt. Auch hier kann, infolge der automatischen Leistungsanpassung des Umrichters an die Resonanzfrequenz (bei veränderter Induktorimpedanz) der Rinne die maximale Leistung ständig zugeführt werden.

Induktorentwicklung

Im Bereich der Induktorentwicklung für Kupfer und Messing konnten in den letzten Jahren deutliche Wirkungsgradverbesserungen um 6 % bis 8 % erreicht werden [62]. Dabei zeigt sich, dass die Entwicklung leistungsfähiger und energiesparender Rinnen-Induktoren genau dem Schmelzmaterial angepasst werden muss. Für Messing ist beispielsweise eine möglichst flache Verteilung der Leistungsdichte in der Rinne anzustreben, um lokale Überhitzungen und Ausdampfungen des Legierungsbestandteiles Zink zu vermeiden. Dies erreicht man z.B. durch Veränderung der Rinnengeometrie und des Rinnenquerschnittes.

Damit lassen sich Energieeinsparungen von ca. 22 kWh_{el}/t realisieren.

5.8 Energielastmanagement in Elektrogießereien

In Elektroschmelzbetrieben trägt die elektrische Energie erheblich zu den Gesamtkosten bei. Der Elektroversorger rechnet bei industriellen Großverbrauchern meist nach einem Arbeitsanteil und einem Leistungsanteil ab. Der Leistungsanteil berechnet sich aus der vom Verbraucher bezogenen maximalen Leistung.

Gewöhnlich wird dabei nicht eine kurzzeitige Momentanleistung als Berechnungsbasis genommen, sondern der Energiebezug in einem Zeitraum von 15 min. Damit ist das primäre Ziel eines Energiemanagement unter der vereinbarten 15-min-Leistungsgrenze zu bleiben, und nicht unbedingt eine Vermeidung aller Momentanspitzen. Die Bildung von Lastspitzen beim Strombezug, die deutlich vom normalen Mittelwert abweichen, ist meist auf zufälligem, gleichzeitigem Einsatz überdurchschnittlich vieler Hauptabnehmer zurückzuführen.

Ein solcher Vorgang lässt sich z.B. mit Hilfe eines so genannten betrieblichen (Energie-) Lastmanagementsystems wirkungsvoll handhaben. Der Abbau von Lastspitzen erfolgt durch kurzzeitiges Abschalten von energieintensiven Prozessen, ohne dass die Produktion ins Stocken geraten soll. Gut eignen sich dafür Prozesse, bei denen ständig ausreichend Energie (z.B. Wärme) gespeichert ist, um diese Zeit zu überbrücken. Das sind in Elektrogießereien z.B. die Schmelzöfen.

6 Einsparmöglichkeiten im Schmelzbetrieb

Aus den Untersuchungen der vier beteiligten Betriebe werden Einsparmöglichkeiten beschrieben. Zusätzlich werden die Themen Bolzenerwärmung und Flüssigmetallanlieferung betrachtet.

6.1 Tiegelöfen

In Betrieb C werden gasbefeuerte Tiegelöfen zum Aufschmelzen und Warmhalten von Aluminium eingesetzt. Es werden sowohl Stand- (200 und 500 kg Fassungsvermögen) als auch Kipptiegel (600 kg) eingesetzt. Die Tiegel wurden erstmals 1980 in Betrieb genommen.

Für diese Ofentypen werden

- detaillierte Messungen über eine repräsentative Produktionswoche ausgewertet
- die energetische Güte der Tiegelöfen bestimmt
- Einsparmöglichkeiten durch Verbesserungsmaßnahmen am bestehenden Ofen
- die Einsparungen durch eine Ofenerneuerung mit modernster Brennertechnik bewertet

Zugleich werden die Erkenntnisse zur Verbesserung der Betriebsabläufe zusammengetragen.

6.1.1 Typische Ofenauslastung und spezifische Schmelzenergien der Schmelztiegel

Über einen Messzeitraum von einer Woche wurden der Energieverbrauch und die Masse des aufgeschmolzenen Aluminiums erfasst und die Ofenauslastung sowie die spezifischen Schmelzenergien ermittelt.

Tabelle 6-1: Auslastung und spez. Schmelzenergie, gemessen an den Tiegelöfen

Ofentyp	Auslastung [%]	Spezifische Schmelz- energie [kWh _{th} /t]	Schmelzwirkungsgrad [%]
Standtiegel SLV 200	12	2 380	14
Standtiegel SLV 500	32	1 290	25
Kipptiegel KLV 600	44	1 430	22

Der Kipptiegel KLV 600 ist energetisch schlechter als der vergleichbare Standtiegel SLV 500. Ursache hierfür ist, am Kipptiegel wird Umlaufmaterial verwendet, am Standtiegel SLV 500 kommt hauptsächlich Blockmaterial zum Einsatz.

Auslastung

Die Auslastung der Tiegel wird durch einen Vergleich der tatsächlichen Schmelzleistung mit der vom Hersteller angegebenen Schmelzleistung ermittelt. Dieser Wert wird in der Praxis selten erreicht, so dass Auslastungen von 70-80% als bereits sehr gut angesehen werden können.

Die Standtiegel SLV 200 werden in der Regel nur ein Mal je Schicht (8h) ausgeschöpft. Sie befinden sich daher großteils im Warmhaltebetrieb und die Auslastung beträgt lediglich 12 %. Höher ist die Auslastung beim Standtiegel SLV 500 und Kipptiegel KLV 600 mit 32 % und 44 %. Diese sind zu Hauptbetriebszeiten im dauerhaften Schmelzbetrieb.

Spezifische Schmelzenergie und Wirkungsgrad

Die spezifische Schmelzenergie liegt mit Werten von 1 290 bis 2 380 kWh_{th}/t relativ hoch. Durch die geringe Auslastung ergibt sich für den Standtiegel SLV 200 der höchsten Wert. Die Wirkungsgrade sind mit 12 bis 15 % relativ niedrig und lassen ein hohes Einsparpotenzial erkennen.

In Abbildung 6-1 ist für die drei Ofentypen die Abhängigkeit der spez. Schmelzenergie von der Ofenauslastung dargestellt.

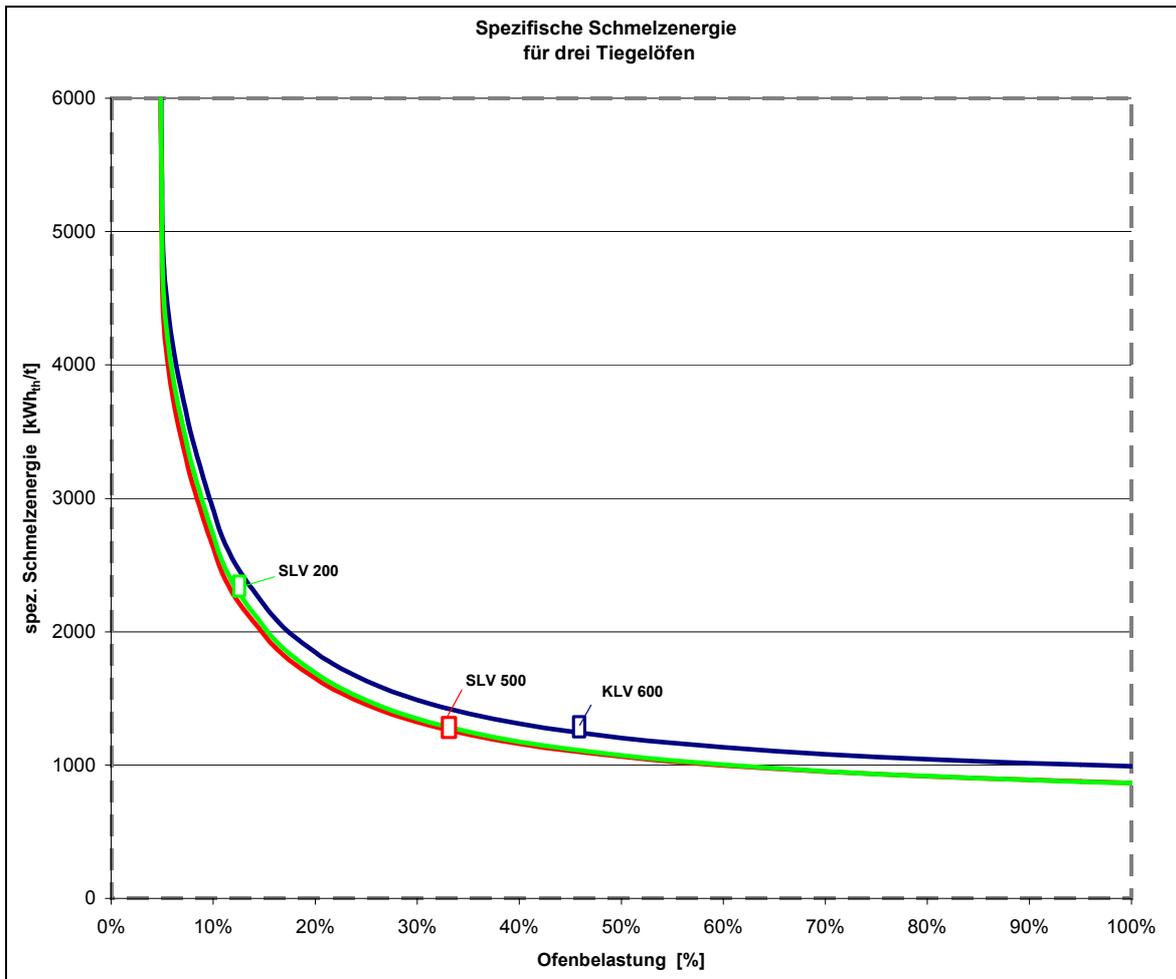


Abbildung 6-1: Gemessene spezifische Schmelzenergie für drei Tiegelöfen

Nachfolgend ist die Aufteilung der Wärmeverluste an Tiegelöfen (IST-Zustand) dargestellt

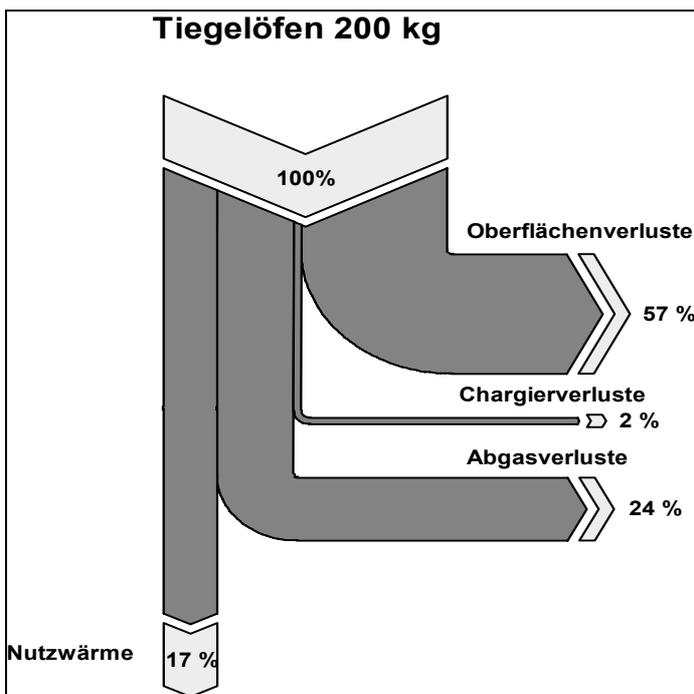


Abbildung 6-2: Aufteilung der Wärmeverluste an den Tiegelöfen 200 kg

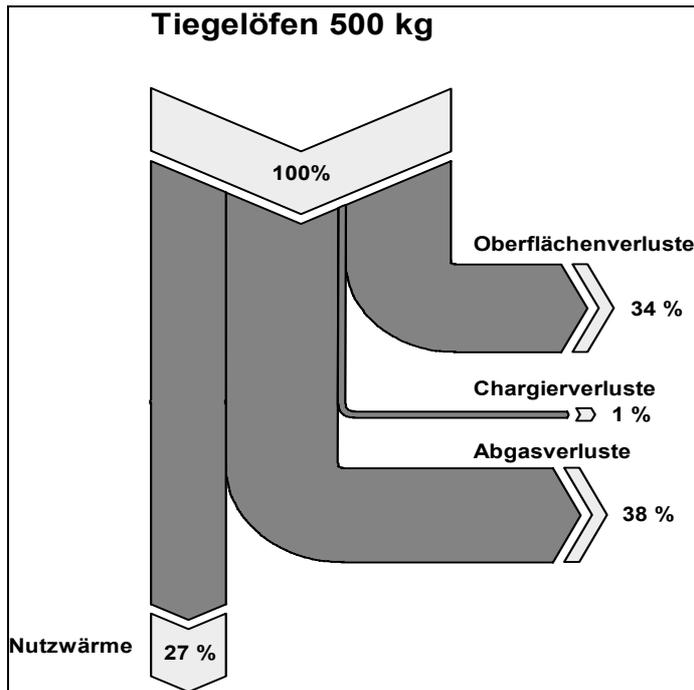


Abbildung 6-3: Aufteilung der Wärmeverluste an den Tiegelöfen 500 kg

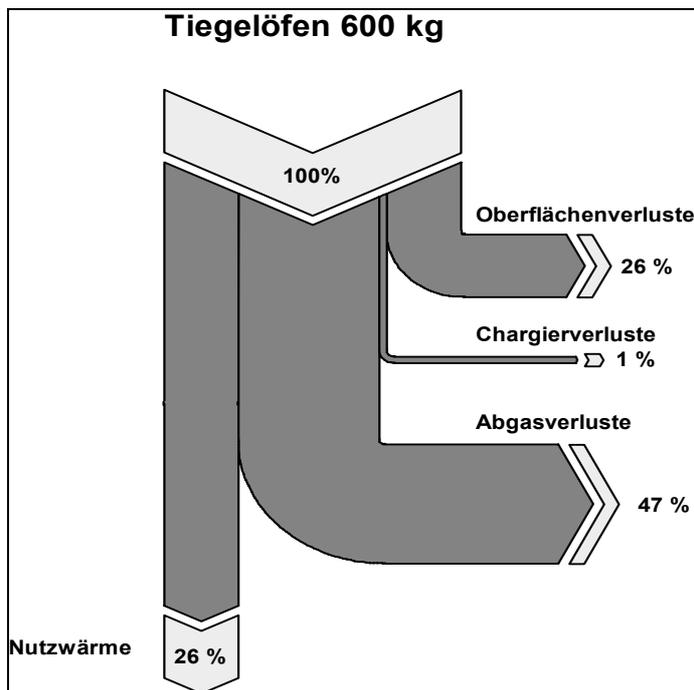


Abbildung 6-4: Aufteilung der Wärmeverluste an den Tiegelöfen 600 kg

6.1.2 Energieeinsparpotenziale beim Betrieb von Tiegelöfen

Die Analyse des Schmelzbetriebes zeigt für den betrachteten Betrieb nachfolgende Einsparmöglichkeiten.

6.1.2.1 Verbesserung der Auslastung der Tiegelöfen

Um Kapazitätsengpässe zu vermeiden, wird die gleiche Legierung an einem Doppelschmelzplatz bereitgehalten. So sind immer mindestens zwei Öfen in Betrieb. Im Falle des Standtiegels SLV200 werden sogar 4 Schmelztiegel gleichzeitig betrieben.

Maßnahmen zur Verbesserung der Auslastung sind u.a.:

- Verschiebung des Vorbereitungszeitraumes zu Wochenbeginn.
Zu Wochenbeginn werden ca. 8 h vor Schichtbeginn alle Tiegelöfen angeheizt und eine erste Charge wird vollständig geschmolzen. Dieser Vorgang dauert ca. 3 h. Danach wird der Tiegel 5 h im Warmhaltebetrieb gefahren.
- Verbesserung der Gießlogistik
Eine verbesserte Logistik zwischen der Materialanforderung von den Gießplätzen würde es erlauben, dass Einzelschmelzplätze stillgelegt und andere höher ausgelastet werden.

Wird die Auslastung verdoppelt, so ergeben sich für einen Doppelgießplatz mit SLV 200-Tiegeln erhebliche Verbesserungen und Einsparungen. Der Energiebedarf sinkt um ca. 36 % (Siehe Tabelle 6-2).

Tabelle 6-2: Einsparung durch Verdoppelung der Auslastung am Beispiel eines Doppelschmelzplatzes mit Standtiegel SLV 200

		Standtiegel SLV 200 Auslastung 12 %	Standtiegel SLV 200 Auslastung 24 %
Auslastung	%	12	24
Spez. Schmelzenergie	kWh/t	2 380	1 520
Jahresgasverbrauch	MWh/a	506	326
Einsparung	%		36
Energiekosten	€/a	17 700	11 400
Invest.-kosten	€	-	-
Amortisationszeit	a	-	-
Einsparung CO ₂	t/a		36

6.1.2.2 Abdeckung der Tiegel

An allen Tiegelplätzen sind Abdeckungen vorhanden. Diese wurden im Messzeitraum nicht eingesetzt, so dass die Oberfläche des Schmelzbades bei allen Tiegelöfen im Wärmeaustausch mit der Umgebung stand. Ein m² Badoberfläche besitzt bei 730 °C Badtemperatur einen Wärmeverlust von ca. 21 kW.

Durch den Einsatz eines einfachen Stahldeckels halbiert sich dieser Verlust, wird ein feuerfest verkleideter Deckel eingesetzt, so reduziert sich dieser Verlust auf 20 %.

Abdeckungen werden sowohl mit von Hand zu betätigenden Schwenkvorrichtungen als auch elektrisch oder pneumatisch betrieben angeboten.

Um einen dauerhaften Einsatz der Deckel durch die Mitarbeiter zu gewährleisten, ist ein elektrisch schwenkbarer Deckel zu empfehlen.

Tabelle 6-3: Einsparung durch Abdeckung der Tiegel im Warmhaltebetrieb am Beispiel eines Doppelschmelzplatzes mit Standtiegeln SLV 200

		Standtiegel SLV 200 ohne Deckel	Standtiegel SLV 200 mit Deckel manuell betätigt	Standtiegel SLV 200 mit Deckel automatisch betätigt
Auslastung	%	12	12	12
Spez. Schmelzenergie	kWh _{th} /t	2 380	1 800	1 800
Jahresgasverbrauch	MWh/a	506	384	384
Einsparung	%		24	24
Jahresenergiekosten	€/a	17 700	13 450	13 450
Invest.-kosten	€	-	800	8 200
Amortisationszeit	a	-	0,2	1,9
Einsparung CO2	t/a		24	24

Durch die Abdeckung ergeben sich Einsparungen von bis zu 24 % bei einer Amortisationszeit von weniger als 2 Jahren. Ist der Tiegel höher ausgelastet, so verringert sich die Einsparung.

6.1.2.3 Erneuerung der Ofenausmauerung und Erneuerung der Tiegel

Die Ofenausmauerung und die Tiegel sind einem hohen Verschleiß ausgesetzt, wobei sich die wärmetechnischen Eigenschaften der Ausmauerung und der Tiegel erheblich verschlechtern. Eine durchschnittliche Standzeit kann nicht angegeben werden, da diese von mehreren Einflussgrößen abhängt und insgesamt deutlich variiert.

Messungen am Tiegelofen SLV 500 zeigen Oberflächentemperaturen von 110 °C bis 230 °C. Ein neu gestellter Ofen besitzt Oberflächentemperaturen von ca. 70 °C.

	Messstelle	Temperatur in °C
		1
	2	112
	3	114
	4	175
	5	195
	6	230

Abbildung 6-5: Messstellen am Tiegelofen SLV 500

Die Einsparung durch eine Erneuerung der Ofenausmauerung beträgt z.B. für den Standtiegel SLV 500 12 %.

Tabelle 6-4: Einsparung durch Erneuerung der Ofenausmauerung am Beispiel eines Doppelschmelzplatzes mit Standtiegeln SLV 500

		Standtiegel SLV 500 alte Ofenausmauerung	Standtiegel SLV 500 neue Ofenausmauerung
Auslastung	%	32	32
Spez. Schmelzenergie	kWh _{th} /t	1 280	1 120
Jahresgasverbrauch	MWh/a	1 275	1 115
Einsparung	%		12
Jahresenergiekosten	€/a	44 550	38 980
Invest.-kosten	€	-	11 700
Amortisationszeit	a	-	2,1
Einsparung CO ₂	t/a		32

6.1.2.4 Einbau eines 2-stufigen Brenners

An den Tiegelöfen werden 1-stufige Kaltluftbrenner eingesetzt. Dies bedeutet, dass sowohl im Aufschmelz- als auch im Warmhaltebetrieb mit der gleichen Brennerleistung gefahren wird.

Eine Verringerung der Brennerleistung im Warmhaltebetrieb verbessert den Feuerungstechnischen Wirkungsgrad und somit die Gesamteffizienz des Ofens. Für den Standtiegel SLV 500 ergibt sich eine Einsparung von 3 %.

Tabelle 6-5: Einsparung durch Einbau eines 2-Stufigen Kaltluftbrenners am Beispiel eines Doppelschmelzplatzes mit Standtiegeln SLV 500

		Standtiegel SLV 500 1-stufiger Brenner	Standtiegel SLV 500 2-stufiger Brenner
Auslastung	%	32	32
Spez. Schmelzenergie	kWh _{th} /t	1 280	1 240
Jahresgasverbrauch	MWh/a	1 275	1 230
Einsparung	%		3
Jahresenergiekosten	€/a	44 550	43 050
Invest.-kosten	€	-	11 000
Amortisationszeit	a	-	7,3
Einsparung CO ₂	t/a		8

6.1.2.5 Erneuerung des Tiegelofens und Einsatz eines Rekuperator- oder Regenerator-Brenners

Der Kipptiegel KLV 600 ist seit 24 Jahren in Betrieb. Die Ofen- und Brennertechnologie hat sich wesentlich verbessert. Wird der alte Kipptiegel durch einen neuen ersetzt und als Brenner ein Rekuperationsbrenner eingesetzt, so ergibt sich eine Einsparung von ca. 35 %.

Die Amortisationszeit beträgt ca. 3,6 Jahre. Die spez. Schmelzenergie verringert sich auf ca. 800 kWh_{th}/t.

Tabelle 6-6: Einsparung durch Erneuerung des Tiegelofens und Einbau eines Rekuperations-Brenners am Beispiel eines Doppelschmelzplatzes mit Kipptiegel KLV 600

		Kipptiegel KLV 600 (Bj.1980) 1-stufiger Brenner	Kipptiegel KLV 600 (neu) Rekuperations-Brenner
Auslastung	%	44	44
Spez. Schmelzenergie	kWh _{th} /t	1 260	800
Jahresgasverbrauch	MWh/a	1 033	670
Einsparung	%		35
Jahresenergiekosten	€/a	36 170	23 490
Invest.-kosten	€	-	45 700
Amortisationszeit	a	-	3,6
Einsparung CO ₂	t/a		72

Alternativ zum Einbau eines Rekuperations-Brenners besteht die Möglichkeit einen Regentor-Brenner einzusetzen. Einsparungen von bis zu 49 % sind möglich.

Tabelle 6-7: Einsparung durch Erneuerung des Tiegelofens und Einbau eines Regenerator-Brenners am Beispiel eines Doppelschmelzplatzes mit Kipptiegel KLV 600

		Kipptiegel KLV 600 (Bj.1980) 1-stufiger Brenner	Kipptiegel KLV 600 (neu) Regenerativ-Brenner
Auslastung	%	44	44
Spez. Schmelzenergie	kWh _{th} /t	1 260	620
Jahresgasverbrauch	MWh/a	1 033	530
Einsparung	%		49
Jahresenergiekosten	€/a	36 170	18 500
Invest.-kosten	€	-	60 000
Amortisationszeit	a	-	3,4
Einsparung CO ₂	t/a		100

6.1.2.6 Weitere Hinweise zum energieeffizienten Betrieb von Tiegelöfen

Vermeidung von Überhitzung (Einsparpotential ca. 5 – 10 %)

Durch fehlende, nicht eingesetzte oder falsch eingestellte Temperaturregler kommt es zu einer Überhitzung des Schmelzgutes. Bei Aluminium beträgt die ideale Schmelzbadtemperatur, je nach Art der Weiterverarbeitung, zwischen 720 °C – 730 °C. Höhere Temperaturen bedeuten nicht nur einen unnötigen Energieaufwand, sondern fördern auch die Oxidation der Schmelze. Hieraus resultiert erhöhter Abbrand.

Notauslauf schließen (Einsparpotential ca. 5 %)

Der Notauslauf eines Tiegelofens dient bei Tiegelbruch dazu, der flüssigen Schmelze einen ungehinderten Ablauf in eine eigens dafür vorgeschriebene Auffanggrube oder ein Sandbett zu gewährleisten. Dadurch werden der Brenner und weitere Einbauten vor dem Eindringen der heißen Schmelze und deren Erhärten bewahrt. Werksseitig ist der Notauslauf mit einer Klappe aus Feuerfeststein versehen. Sie verhindert bei Betrieb des Brenners ein Austreten der Abgase und mindert so die Abgasverluste. Bei Brennerstillstand wird eine Auskühlung des Tiegels durch Fremdluftansaugung, die durch den natürlichen Kaminzug entsteht, verhindert.

Füllstand der Tiegel (Einsparpotenzial ca. 5 – 10 %)

Um die volle Schmelzleistung eines Tiegelofens zu nutzen, sollte der Tiegel nie ganz entleert werden, sondern immer ein Rest an Schmelze vorhanden sein. Wird der Tiegel komplett entleert, wird die Wärme von der Tiegelwandung nur durch die Luft (Wärmestrahlung) an das Schmelzgut übertragen. Durch die flüssige Schmelze ist der Wärmeübergang (Wärmeleitung) an das zu schmelzende Gut viel besser und damit der Schmelzprozess effizienter.

6.2 Schachtschmelzöfen

Eine Analyse der Schachtschmelzöfen (Typ StrikoWestofen) im Betrieb D, wie sie in Kapitel 4.5 dargestellt ist, zeigt verschiedene Energieoptimierungspotenziale auf, die erschlossen werden können. Erst nach Durchführung der internen Maßnahmen sollte über eine externe Abwärmenutzung im Betrieb D nachgedacht werden, weil Modifikationen des Prozesses veränderte Abgaswerte nach sich zieht.

Die wirtschaftliche Bewertung der Abwärmenutzung wird in Kapitel 7 ausführlich diskutiert.

Die nachfolgend für die Schachtschmelzöfen der Firma StrikoWestofen im Betrieb D getroffenen Aussagen lassen sich auf die Schmelzöfen mit kurzem Schacht der Firmen ZPFtherm und Jasper nicht übertragen, weil diese Systeme über andere spezifische Konstruktionen und Installationen verfügen.

6.2.1 Optimierungsmaßnahmen für den Schachtschmelzofenprozess

Die folgenden Absätze fassen die Basisdaten für den Vergleich zwischen dem aktuellen und einem zukünftigen optimierten Betriebszustand zusammen. In der nachfolgenden Tabelle 6-8 sind die Maßnahmen zur Optimierung des Schachtschmelzofenprozesses im Betrieb D und die daraus resultierenden möglichen Erdgaseinsparungen gegenübergestellt.

zu 1./2.: Kontinuierliche Einhaltung des maximalen Schachtfüllstandes und Optimierung der Schachtgeometrie zur verbesserten Vorwärmung des Chargiergutes

Aufgrund seiner ungeeigneten Dimensionierung war der Schacht während der Messaufnahme nicht gleichmäßig gefüllt. Eine ungleichmäßige Materialschüttung führte zu einer unvollständigen Wärmeausnutzung der Abgaswärme. Dabei weist der Schacht eine Höhe von 2 m auf. Üblicherweise lassen sich durch diese Vorwärmzone Erdgasmengen von bis zu $400 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{t}_{\text{Al}}$ beim Einschmelzen im Vergleich zu einem Herdofen ohne Schacht ($1\,000 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{t}_{\text{Al}}$) ein.

zu 3.: Regelung der Brenner beim Freischmelzen

Die so genannte Freischmelzdauer beträgt bei drei Schichten pro Tag ca. 4,5 h. In dieser Phase sind drei Schmelzbrenner bei voller Last in Betrieb. Betriebserfahrungen an anderen Öfen zeigen, dass dagegen auch der Betrieb mit zwei Brennern oder sogar nur einem Schmelzbrenner möglich ist. Drei Schmelzbrenner benötigen ca. 180 m^3 Erdgas, demgegenüber benötigen zwei lediglich 120 m^3 Erdgas pro Stunde. Somit können pro Produktionstag 270 m^3 Erdgas eingespart werden. Dies entspricht unter den betrachteten Messbedingungen einer möglichen Einsparung von ca. $60 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{t}_{\text{Al}}$ beim Einschmelzen.

zu 4: PI-Regelung für Warmhaltebrenner (stufenloser Betrieb)

Die Warmhaltebadtemperatur variiert zwischen 690 und 735 °C . Die großen Schwankungen basieren auf der Ein-/Aus-Regelung der beiden Warmhaltebrenner. Hohe Spitzentemperaturen führen zu erhöhten Wärmeverlusten. Könnte man die Spitzentemperaturen an der Badoberfläche um 30 bis 40 °C reduzieren, dann wäre eine Einsparung von 8% Erdgas mit Bezug auf den reinen Warmhalteverbrauch zu erzielen /65/. Im aktuellen Fall könnte dann eine Einsparung von $30 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{h}$ oder $20 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{t}_{\text{Al}}$ im kombinierten Schmelz- und Warmhaltebetrieb erzielt werden. Weitere Vorteile sind in der geringeren thermischen Belastung des Feuerfestmaterials im Bereich des Warmhaltebades zu sehen.

zu 5.: Fehlerfreie Regelung des Warmhaltebadfüllstandes

Das Warmhaltebad ist mit einer Füllstandssonde ausgerüstet, welche die Schmelzbrenner im Falle eines bevorstehenden überlaufenden Warmhaltebades ausschaltet. Eine defekte Füllstandssonde führt aufgrund der daraus folgenden (zu) langen Schmelzbrennerlaufzeiten zu einem erhöhten Erdgasverbrauch. Wenn die Schmelzbrenner eine halbe Stunde pro Tag länger in Betrieb sind als notwendig, ist dies gleichbedeutend mit einem zusätzlichen Erdgasverbrauch von 90 m^3 Erdgas pro Tag.

zu 6.: Einsatz einer Abgasklappe im Warmhaltebetrieb am Wochenende

Eine im Kamin installierte Abgasklappe verhindert einen Kaminzug im Schachtschmelzofen, der dem Ofen während der reinen Warmhaltephase am Wochenende Wärme entzieht. Die Abgasverluste können mit einer Abgasklappe um bis zu 30 % reduziert werden. Während des reinen Warmhaltebetriebes entspricht dies einer Reduzierung des Erdgasverbrauches von ca. 8 bis 10 m³ Erdgas pro Stunde.

zu 7.: Chargierung (50 % Bl./50 % Kr.) anstelle (60 % Bl./40 % Kr.)

Die Zusammensetzung des Chargierungsmaterials beeinflusst den Erdgasverbrauch. Füllt man den Schachtschmelzofen nur mit Blockmaterial (100 %), so beläuft sich der spezifische Energiebedarf für den reinen Schmelzbetrieb auf 690 kWh_{th}/t_{Al}. Demgegenüber sinkt der spezifische Erdgasverbrauch auf 600 kWh_{th}/t_{Al}, wenn die Befüllung eine Mischung aus 50 % Blockmaterial und 50 % Kreislaufmaterial bildet. Die Durchströmungsverhältnisse und der Wärmeaustausch werden durch den Zusatz an Kreislaufmaterial verbessert. Wird der Anteil an Kreislaufmaterial um 10 % erhöht, nimmt der spezifische Erdgaseinsatz zum Einschmelzen um 18 kWh_{th}/t_{Al} ab.

zu 8.: Kontinuierlicher und voll ausgelasteter Ofenbetrieb

Der reine Warmhaltebetrieb am Wochenende erfordert es, dass 40 kWh_{th}/t_{Al}h) oder 4 m³ Erdgas pro Tonne Aluminium im Warmhaltebad und pro Stunde bereitgestellt werden müssen. Würde der Ofen kontinuierlich ohne Unterbrechung am Wochenende betrieben, könnte der Erdgasverbrauch um 40 bis 80 kWh_{th}/t_{Al} reduziert werden.

Tabelle 6-8: Optimierung des Schachtschmelzofenprozesses (Betrieb D, Striko 3)

		Reduzierung des spezifischen Energieverbrauchs	Jährl. mittlere Erdgasreduzierung ¹⁾
		kWh _{th} /t _{Al}	m ³ /a
	Aktueller Erdgasverbrauch	870	
	Optimierungsmaßnahmen		
1.	Kontinuierliche Einhaltung des maximalen Schachtfüllstandes	- 50 bis - 100	85 500
2.	Optimierung der Schachtgeometrie zur verbesserten Vorwärmung des Chargiergutes		
3.	Regelung der Brenner beim Freischmelzen	- 40 bis - 80	68 400
4.	PI-Regelung für Warmhaltebrenner (stufenloser Betrieb)	- 10 bis - 20	11 400
5.	Fehlerfreie Regelung des Warmhaltebadfüllstandes	- 10 bis - 20	11 400
	Erdgasverbrauch nach Optimierungsmaßnahmen	720	
	Summe der jährlichen Einsparung		176 700
	Weitere Potenziale		
6.	Einsatz einer Abgasklappe im Warmhaltebetrieb am Wochenende	- 10	11 400
7.	Chargierung (50 % Bl./50 % Kr.) anstelle (60 % Bl./40 % Kr.)	- 10 bis - 20	17 100
8.	Kontinuierlicher und voll ausgelasteter Ofenbetrieb	- 40	45 600
	Summe der jährlichen Einsparung		74 100

¹⁾ Die Berechnung berücksichtigt eine Jahresschmelzleistung des Schachtschmelzofens von 11 400 t Al/a.

Ergänzend zu den oben aufgeführten Maßnahmen zur Optimierung des Schachtschmelzofenbetriebes wird den Betreibern empfohlen, permanent und konsequent folgende Energieoptimierungsansätze zu verfolgen:

Moderater Investitionsaufwand

- Verminderung des Krätzeanfalls (Schlacke mit Aluminiumeinschlüssen)
- Verschließen der Ofentür, Schaulöcher, Gießschnauze
- Reduzierung der Warmhaltebadtemperatur am Wochenende (siehe Kapitel 4.5.1)

- Verkürzung der Reinigungszeiten
- Reduzierung der Teillastzeiten
- Vermeidung ungenauer Brennereinstellungen
- Reduzierung schwankender Metalltemperaturen im Warmhaltebad
- Pflege der Ofentür und der Ofenzustellung
- Pfannenaufheizung mit Abdeckung (10 bis 20 % Erdgaseinsparung)

Mittlerer bis höherer Investitionsaufwand

- Feuerfestmaterialauswahl mit ausgewogener Gewichtung hinsichtlich der Isolationsfähigkeit (Vermeidung von Wärmeverlusten), Temperaturwechselbeständigkeit, Verschleißfestigkeit und Widerstandsfähigkeit gegenüber Korundbildung (Bildung von Aluminiumoxid: $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)
- Ausstattung der Schmelzöfen mit Wiegezellen und kontinuierlicher Prozessdatenerfassung
- Optimierung der Absaugung
- Materialvorwärmung in separaten (externen) Kammern
- Prüfung des Einsatzes von Spülsteinen und elektromagnetischen Rührern



Abbildung 6-6: Pfannenaufheizung ohne Abdeckung mit erhöhten Wärmeverlusten

6.2.2 Einsparung durch Prozessoptimierung

Die folgende Tabelle fasst die Basisdaten für den Vergleich zwischen dem aktuellen und einem zukünftigen optimierten Betriebszustand zusammen.

Tabelle 6-9: Spezifischer Erdgasverbrauch und Emissionen des Ofens Striko 3 (IST-Zustand)

	Einheit	Wert
Schmelzleistung bei aktueller Auslastung des Ofen	t/h	1,9
Aktueller spez. Erdgasverbrauch des Ofen	kWh/t	870
Spez. Erdgasverbrauch nach Optimierung des Ofen	kWh/t	720
aktive Betriebszeit pro Jahr	h	7 200
CO₂-Emission pro verfeuerten Erdgas	kg CO ₂ /m ³ Gas	1,7
Durchschnittliche produzierte Abgaswärme	kW	270

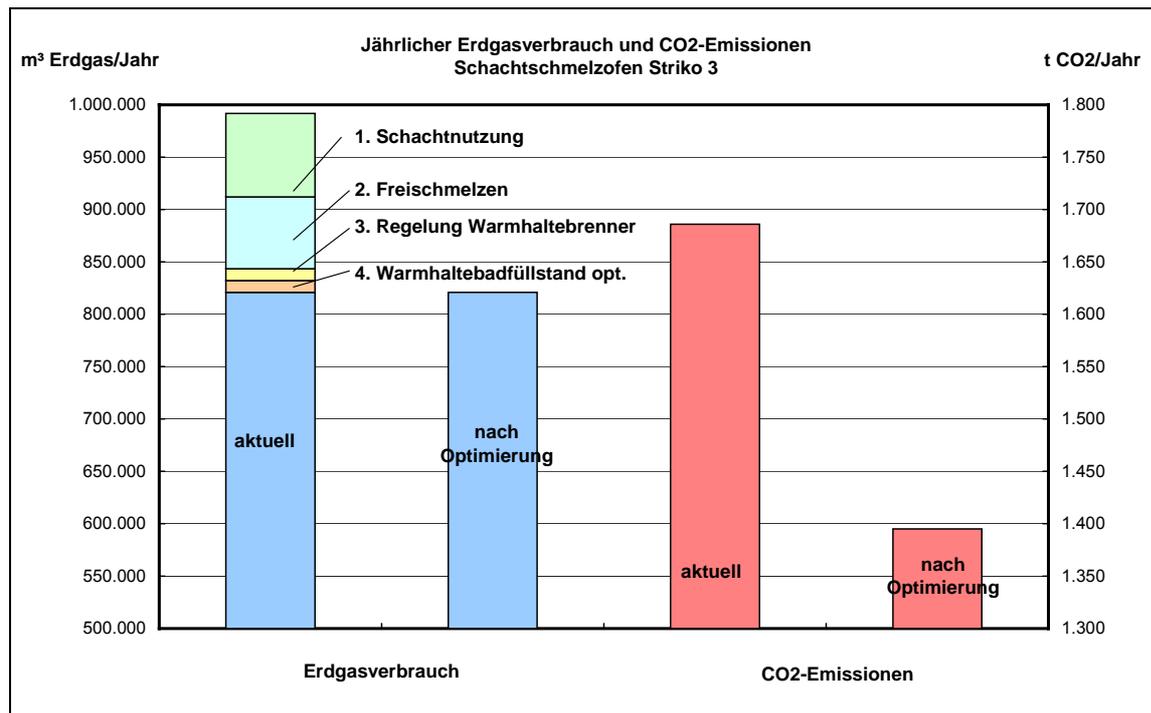
In der nächsten Tabelle wird ausgewiesen, dass die Optimierung des Schachtschmelzofens Striko 3 deutliche Einsparungen mit Bezug auf Erdgasverbrauch und Kohlendioxidemission mit sich bringt.

Tabelle 6-10: Mögliche Einsparungen an Erdgas und CO₂-Emissionen am Ofen Striko 3

		aktuell ¹⁾	nach Optimierung	Einsparung total
Ergasverbrauch	m ³ /Jahr	991 800	820 800	171 000
CO₂-Emissionen	t CO ₂ /Jahr	1 686	1 395	291

¹⁾ Basis: 11 400 t_{Brutto} Al/a

Diese quantitativen Änderungen sind in Abbildung 6-7 hinsichtlich der Einflüsse auf den Erdgasverbrauch und die CO₂-Emissionen verdeutlicht ¹.



¹⁾ 1 m³ entsprechen 10 kWh

Abbildung 6-7: Vergleich des Erdgasverbrauchs und der CO₂-Emissionen vor und nach einer möglichen Optimierung (ohne Abwärmenutzung)

6.2.3 Wirtschaftlichkeit der Prozessoptimierung

Die Reduzierung des Erdgasverbrauches am Ofen Striko 3 würde zu den in Abhängigkeit von den bestehenden Erdgaspreisen aufgelisteten Einsparungen führen. Die Einsparung durch ausschließliche Prozessoptimierung des Schachtschmelzofens Striko 3 (ohne Abwärmenutzung) beträgt:

- bei 0,30 €/m³ 51 300 €/Jahr,
- bei 0,50 €/m³ 85 500 €/Jahr.

6.3 Energieeinsparung durch Anlieferung von Flüssigmetall

Aluminium wird in aller Regel in so genannten Sekundärhütten eingeschmolzen, dort in Barren gegossen und in die Schmelzbetriebe geliefert. Dort wird es ein zweites Mal aufgeschmolzen und dem Gießereiprozess zugeführt.

Eine oftmals kostengünstige Alternative hierzu ist, das Aluminium von den Sekundärhütten in flüssiger Form anliefern zu lassen. Das Aluminium wird hierzu in Spezialbehälter von 4,5 bis 5,6 t abgefüllt und per LKW direkt in die Gießereibetriebe geliefert.

In vielen Gießereibetrieben wird aus Kostengründen an eine Umstellung auf Flüssigmetallanlieferung gedacht. Zweifellos bedeutet dies für die Gießerei durch den Wegfall des Schmelzbetriebs eine erhebliche Einsparung an Energie. Ob der gesamte Prozess der Flüssigmetallanlieferung günstiger ist, erfordert eine Betrachtung aller Prozesse in der Sekundärhütte, beim Straßentransport und in der Gießerei (siehe auch Tabelle 6-11).

Bei der Umstellung auf eine Flüssigmetallanlieferung ändern sich auch die Materialflüsse. Bei 35 % Umlaufmaterial muss im Falle einer Flüssigmetall-Anlieferung neben dem Flüssigmetall auch das Umlaufmaterial über die Straße transportiert werden.

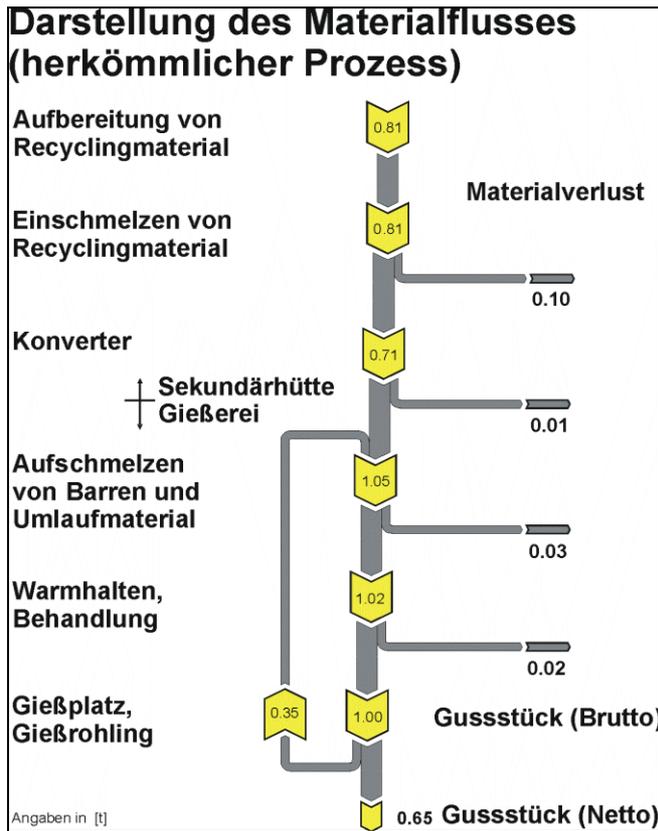


Abbildung 6-8: Materialfluss für die Anlieferung von Blockmaterial (herkömmlicher Prozess)

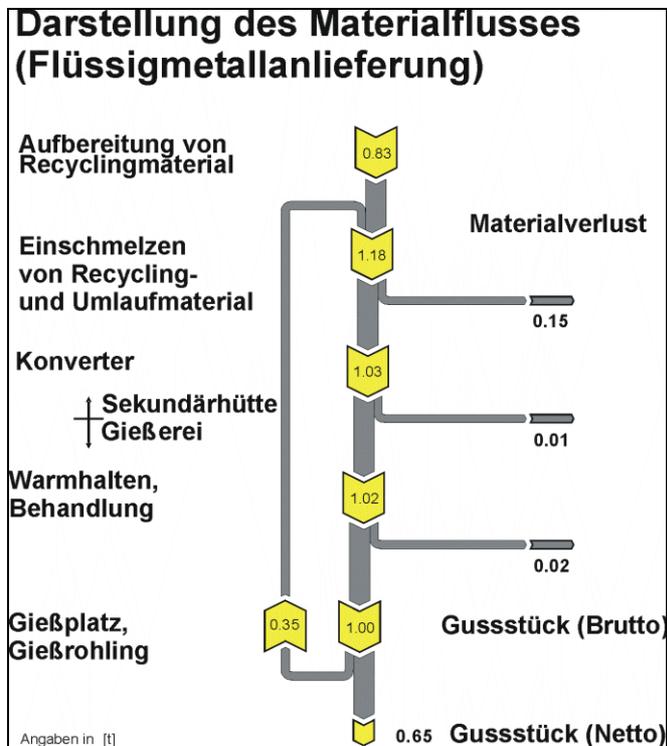


Abbildung 6-9: Materialfluss für die Anlieferung von Flüssigmetall

Beim Flüssigmetalltransport muss in der Sekundärhütte deutlich mehr (1,18 zu 0,81 t_{Sekundärhütte}/t_{Gussstück, brutto}) aufgeschmolzen werden.

Bei beiden Prozessen wird 1 Tonne am Gießplatz bereitgestellt.

Tabelle 6-11: Energetisch relevante Prozesse bei der Lieferung von Blockmaterial und bei der Lieferung von Flüssigmetall

		Lieferung von Blockmaterial	Lieferung von Flüssigaluminium
Sekundär-Hütte	1	Aufbereiten von Recycling- und Umlaufmaterial	Aufbereiten von Recycling- und Umlaufmaterial
	2	Einschmelzen von Recyclingmaterial	Einschmelzen von Recycling- und Umlaufmaterial
	3	Legierungsaufbereitung im Konverter	Legierungsaufbereitung im Konverter
	4a	Gießen der Barren	
	4b		Vorwärmen des Transportbehälters
	4c		Abfüllen des Aluminiums
Straßentransport	5a	Transport der Barren (LKW, 40 t)	Transport des Flüssigmetalls (LKW, 40 t)
	5b	Transport von Spänen	Transport von Umlaufmaterial
Gießerei	6	Einschmelzen von Barren und Umlaufmaterial	
	7	Warmhalten und Schmelzbehandlung	Warmhalten und Schmelzbehandlung
	8	Warmhalten am Gießplatz	Warmhalten am Gießplatz

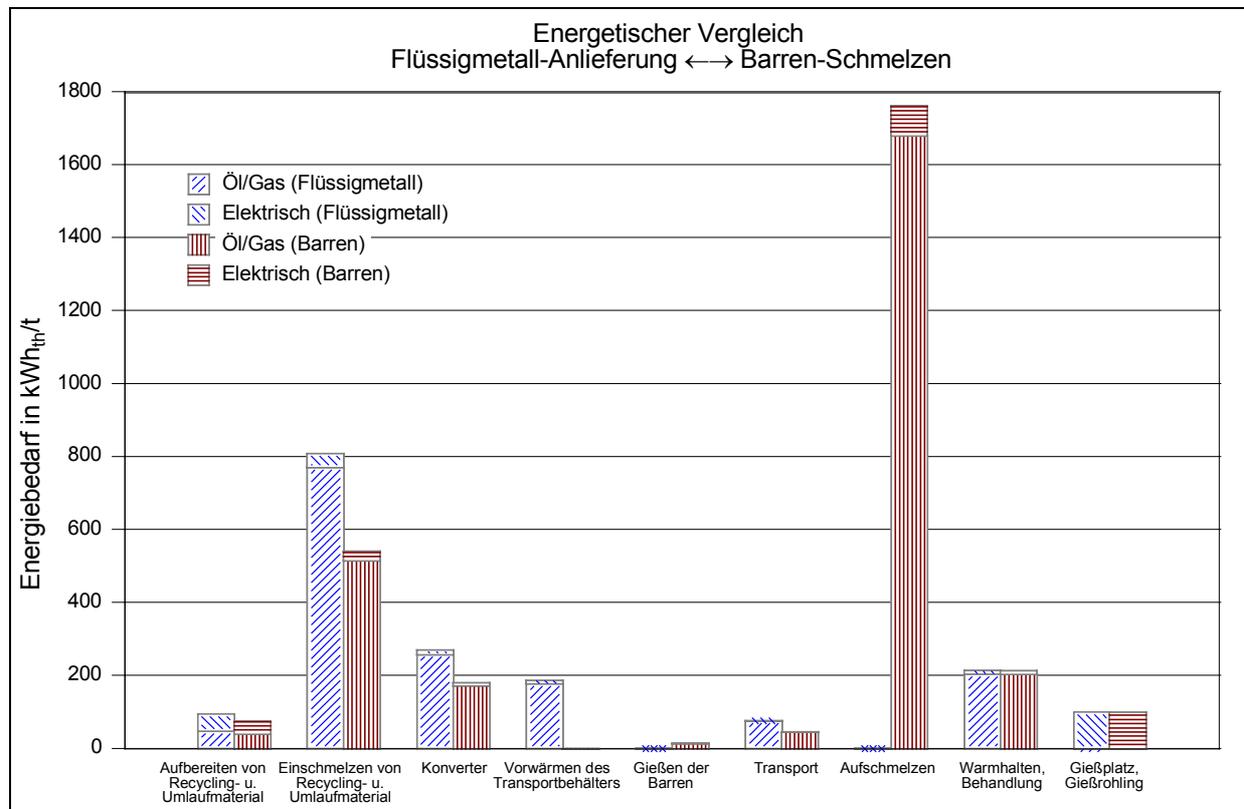


Abbildung 6-10: Energetischer Vergleich des Energiebedarf der Teilprozesse bei der Anlieferung von Barren und Anlieferung von Flüssigmetall

6.3.1 Vergleich der Prozesse

Den Energiebedarf aller Einzelprozesse bei der Anlieferung von Blockmaterial zeigt Abbildung 6-10. Die Untersuchung beruht auf Daten, die im Rahmen der Untersuchungen für die Firma B erfasst wurden. Die verwendeten spezifischen Energieaufwandszahlen sind in Tabelle 6-13 zusammengestellt. Zudem wird davon ausgegangen, dass 35 % Umlaufmaterial im Gießereibetrieb direkt wieder eingeschmolzen wird. Es zeigt sich, dass der Schmelzprozess, mit einem spezifischen Energieverbrauch von 1600 kWh_{th}/t, den Gesamtenergiebedarf dominiert.

Bei der Anlieferung von Flüssigmetall bestimmt das Einschmelzen in der Sekundärhütte den Gesamtenergiebedarf. Bei 100 km Transportweg ist der Energiebedarf für den Transport noch von geringer Bedeutung. Transportiert werden zum einen das Flüssigmetall und zum anderen das Rücklaufmaterial von der Gießerei an die Sekundärhütte. Je 100 km Transportweg werden ca. 75 kWh_{th}/t angewendet.

Einen Vergleich zwischen dem konv. Schmelzprozess in der Gießerei und dem Prozess der Flüssigmetallanlieferung zeigen Tabelle 6-12 und Abbildung 6-11. Variiert sind die wesentlichen Einflussfaktoren. Diese sind bei der Anlieferung von Blockmaterial (Barren) der spez. Energieaufwand für den Schmelzbetrieb in der Gießerei von 1 600 auf 600 kWh_{th}/t und für den Fall der Flüssigmetallanlieferung die Entfernung zwischen Gießerei und Hütte (von 100 auf 500 km).

Es können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Die Anlieferung von Flüssigmetall ist in aller Regel energetisch günstiger als der Schmelzbetrieb in einer Gießerei.
- Diese Aussage gilt sowohl für den Gesamtenergieverbrauch (Hütte, Transport, Gießerei) als auch für den Energiebedarf der Gießerei.
- Bei der Umstellung auf Flüssigmetall verringert sich der Gesamtenergieaufwand (Summe der Bedarfe in der Hütte, beim Transport und im Gießereibetrieb) von 2 690 kWh_{th}/t auf 1 640 kWh_{th}/t.
- Für den Gießereibetrieb reduziert sich der thermische Energieaufwand von 1 880 kWh_{th}/t auf 210 kWh_{th}/t.
- Nur wenn der Schmelzprozess in der Gießerei optimal, d.h. mit einem spez. Energieaufwand kleiner 600 kWh_{th}/t, betrieben wird, hat aus gesamtenergetischer Sicht die Flüssigmetallanlieferung keine Vorteile mehr.
- Der Transportweg hat mit ca. 75 kWh_{th}/km nur einen geringen Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf.

Tabelle 6-12: Vergleich der spezifischen Energiebedarfswerte für die Bereiche Sekundärhütte, Straßen-transport und Gießerei

	Sekundärhütte [kWh _{th} /t]	Straßentransport [kWh _{th} /t]	Gießerei [kWh _{th} /t]	Summe [kWh _{th} /t]	CO₂ Emission kgCO ₂ /t
Lieferung von Barren und Einschmelzen mit 1 600 kWh/t	761	47	1 885	2 693	720
Lieferung von Barren Einschmelzen mit 600 kWh/t	761	47	834	1 642	476
Flüssigmetallanlieferung (100 km Transportweg)	1 239	76	204	1 519	444
Flüssigmetallanlieferung (500 km Transportweg)	1 257	379	204	1 840	538

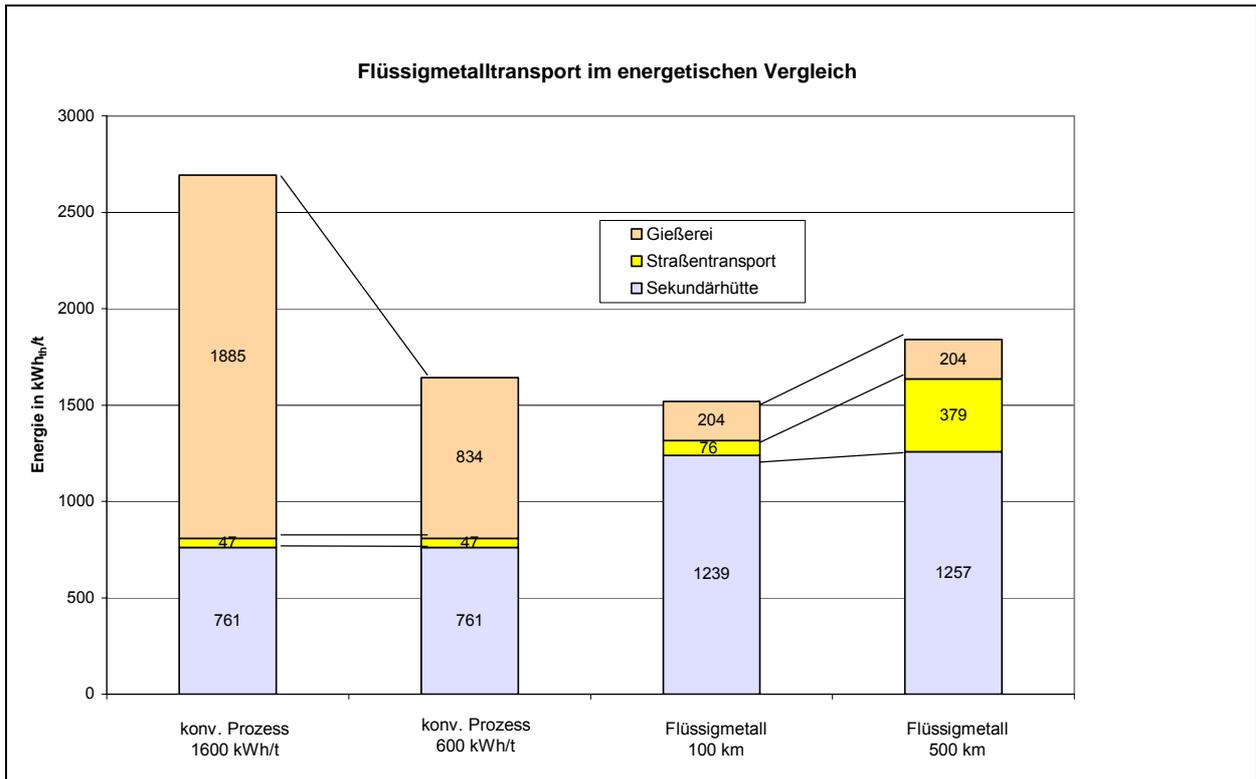


Abbildung 6-11: Flüssigmetalltransport im energetischen Vergleich

Dargestellt sind die spezifischen Energiebedarfswerte (thermisch) der Prozesse „Anlieferung von Blockmaterial und Einschmelzen“ und „Flüssigmetallanlieferung“ bei variablen Energiekennzahlen zum Aufschmelzen in der Gießerei (1 600 kWh/t bis 600 kWh/t) und Entfernungen zwischen Hütte und Gießerei (100 km – 500 km).

Tabelle 6-13: Kennzahlen zur Beurteilung der energetischen Prozesse

		Prozess	Spezifischer Energieaufwand [kWh _{th} /t]	Abbrand [%]
Sekundärhütte	1	Aufbereiten von Recycling- und Umlaufmaterial	40	0
	2	Einschmelzen von Recyclingmaterial	650	15*
	3	Legierungsaufbereitung im Konverter	250	1
	4a	Gießen der Barren	20	0
	4b	Vorwärmen der Transportbehälter	150	0
Straßentransport	5a	Transport der Barren und Späne	36 (je 100 km)	0
	5b	Transport von Flüssigmetall	57 (je 100 km)	0
Gießerei	6	Einschmelzen von Barren und Umlaufmaterial	600 – 1 600	2
	7	Warmhalten und Schmelzbehandlung	200	2
	8	Warmhalten am Gießplatz	100 (elektr.)	0

*) Gewichtsverlust beim Einschmelzen des Recyclingmaterials, Aluminiumabbrand ca. 5 %

Die Daten für die Sekundärhütte und den Flüssigmetalltransport basieren auf Angaben der Fa. Konzelmann, Neu-Ulm.

6.3.2 Transportbehälter

Eine wichtige Komponente beim Flüssigmetalltransport ist der Transportbehälter.

Für den Flüssigmetalltransport werden Transportbehälter mit einem Fassungsvermögen von 4,5 bis 5,6 t eingesetzt. Die Behälter sind geprüft und haben eine Zulassung für den Transport.

Wesentliche Konstruktionsmerkmale sind:

- Durchmesser 1 700 – 1 950 mm
- abnehmbarer Deckel mit Revisionsöffnung
- Ausgießschraube, verschließbar
- Auskleidung mit Feuerfestmaterial und Dämmmatten
- Arretiervorrichtung zum Transport (LKW + Kran)

Flüssigmetallbehälter werden mit einer 60 bis 80 mm starken feuerfesten Verschleißschicht aus Schamottstein, einer ersten Isolierung (60 – 80 mm) aus Feuerleichtsteinen und zwei Lagen Isoliermatte (2*10 mm) aus keramischen Fasern zugestellt. Entscheidend für die Wärmeverluste sind die Güte und die Funktionsfähigkeit dieser Zustellung, insbesondere der Isoliermatte. Bei Überhitzung besteht jedoch die Gefahr, dass die Dämmschicht anklebt und an Wirksamkeit verliert /23/. So werden an gebrauchten Behältern Oberflächentemperaturen von 100 – 150 °C gemessen. An neu zugestellten Behältern sollten die Oberflächentemperaturen bei funktionsfähiger Dämmschicht 70 °C nicht überschreiten. Die Auskühlung der Behälter kann so auf ca. 8 K/h begrenzt werden. An gebrauchten Behältern beträgt die Auskühlung 12 – 20 K/h.

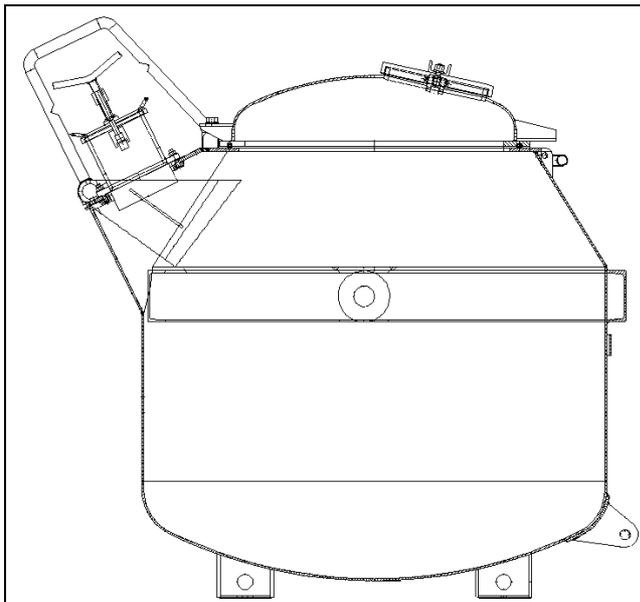


Abbildung 6-12: Darstellung eines Transportbehälters für Flüssigmetall

Schlussfolgerungen:

- Die Transportbehälter weisen, trotz Zustellung mit Feuerleichtsteinen und Isoliermatten, in der Praxis eine unzureichende Dämmung auf.
- Die Dämmeigenschaften werden durch Verschleiß der Ausmauerung und einer Minderung der Dämmeigenschaften durch Überhitzung gemindert.
- Verbesserte Zustell- und Dämmmaterialien sind erforderlich. Die Kapselung der Behälter auf dem LKW kann sich nur gering vorteilhaft auf die Temperatur auswirken.
- An neu zugestellten Behältern sollten die Oberflächentemperaturen 70 °C nicht überschreiten. Neuwertige Behälter sollten bevorzugt werden.

6.4 Elektrisch beheizte Schmelz- und Warmhalteöfen (Betrieb A)

Die Gießerei des Betriebs A besteht aus 4 Gießanlagen. Eine Gießanlage fasst jeweils zwei bis drei Schmelzöfen zusammen, die einen gemeinsamen Warmhalte- bzw. Vergießofen speisen (siehe obige Skizze der Gießanlage 4). Die Schmelzöfen (insgesamt 7 Induktions-Tiegelöfen und 2 Induktions-Rinnenöfen) arbeiten diskontinuierlich. Als Schmelzmaterial kommt neben Stückgut (Schrott oder Masseln) überwiegend Verarbeitungsabfall (Späne) zum Einsatz.

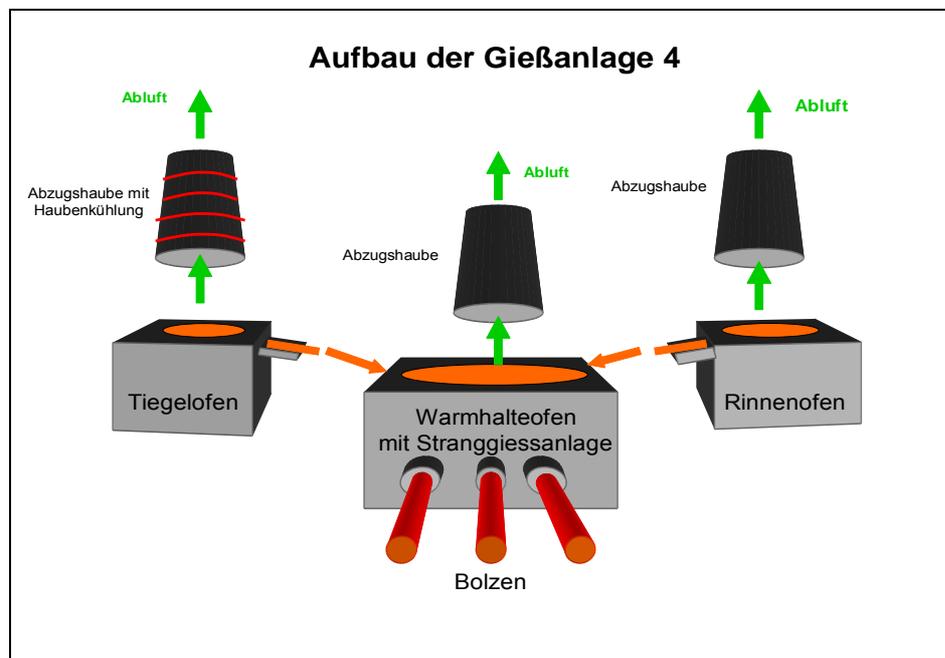


Abbildung 6-13: Aufbau der Gießanlage 4

6.4.1 Anlagenbezogene spezifische Energieverbräuche

In einer ersten Analyse wurden die 4 Gießanlagen als energetische Einheit betrachtet und während einer störungsfreien dreiwöchigen Produktionszeit jeweils der spezifische Energieverbrauch für das Schmelzen und Warmhalten von Messing ermittelt:

Tabelle 6-14: Spezifische Stromverbrauchswerte der Gießanlagen

	Einheit	Gießanlage 1	Gießanlage 2	Gießanlage 3	Gießanlage 4
spezifischer Stromverbrauch	kWh _{el} /t	340	300	330	280
branchenüblicher Stromverbrauch (Stückgut/Späne)	kWh _{el} /t	225-260/ 270-320	225-260/ 270-320	225-260/ 270-320	225-260/ 270-320
theoretische minimale Schmelzenergie bei (1 000 °C)	kWh _{el} /t	ca. 180	ca 180	ca 180	ca 180

alle Werte gerundet

Die höchsten elektrischen Verbrauchswerte (Tabelle 6-14) mit 340 bzw. 330 kWh_{el}/t zeigen die Anlagen 1 und 3, die jeweils mit 2 Tiegelöfen bestückt sind. Anlage 1 ist über 30 Jahre alt, Anlage 3 ist eine neuere Anlage mit doppelter Schmelzleistung. Deutlich niedrigere spezifische Verbräuche mit 300 bzw. 280 kWh_{el}/t ergeben sich für die Anlagen 2 bzw. 4. Neben einem bzw. zwei Tiegelöfen sind diese jeweils mit einem Induktions-Rinnenofen bestückt.

Alle Ergebnisse liegen deutlich über den branchenüblichen Werten für Rinnenöfen (225 kWh_{el}/t) bzw. Tiegelöfen (260 kWh_{el}/t) mit stückigem Schmelzgut. Das Ergebnis relativiert sich jedoch, wenn es mit den bekannten Werten für das Einschmelzen von Spänen verglichen (270 kWh_{el}/t bis 320 kWh_{el}/t) und der Energieverbrauch im Warmhalteofen zu den Branchenwerten addiert (ca. 12 kWh_{el}/t) wird.

Potenziale und Maßnahmen für die Gießanlagen als Gesamtsystem

Wie gezeigt, liegen die Kennzahlen für den spezifischen Energieverbrauch z.T. geringfügig oberhalb der Spannweite branchenüblicher Vergleichswerte. Für die Gießanlage 1 wird daher der Nutzen eines evtl. Ersatzes durch eine neue Anlage gleichen Typs geprüft.

Tabelle 6-15: Darstellung der Wirtschaftlichkeit Tiegelöfen

Maßnahme	Einheit	Beibehaltung der Anlage	Ersatz durch 2 neue Tiegelöfen
Investition	€	-	900 000
Minderung Energieverbrauch	MWh/a	-	1 200
Einsparung Energiekosten (Preisbasis 0,05 €/kWh)	€/a	-	60 000

Es ist offensichtlich, dass ein Ersatz der Gießanlage allein aus energetischen Gründen unrentabel ist.

Spezifische Verbrauchswerte für Erdgas

Tabelle 6-16: Gemessene spezifische Gasverbräuche der Messinggießanlagen

	Gießanlage 1	Gießanlage 2	Gießanlage 3	Gießanlage 4
Spezifischer Energieverbrauch in kWh_{th}/t	95	1.5	4	3

Die spezifischen Gasverbrauchswerte Tabelle 6-16 liegen, da Gas nur als Hilfsenergie eingesetzt wird, erklärbar deutlich unter den elektrischen Verbrauchswert.

Einzig die Gießanlage 1 verbraucht mit 95 kWh_{th}/t einen nennenswerten Anteil fossiler Brennstoffenergie. Ursache ist eine offene Gießrinne, die ständig auf hoher Temperatur gehalten werden muss, um bei periodischem Gießen Erstarrungen des flüssigen Messings zu vermeiden. Dies wird mit offenen Gasflammen durchgeföhrt. Von dieser Energie entweichen mehr als 2/3 ungenutzt in die Halle.



Abbildung 6-14: Ansicht einer mittels Gasflammen beheizten offenen Gießrinne

6.4.2 Potenziale und Maßnahmen für die offene Gießrinne

Die Methode des gegenwärtigen Warmhaltebetriebs erfordert eine Energiezufuhr von 1 350 MWh/a. Trotz (lang zurückliegender) negativer Erfahrungen mit Änderungen an Technik und Betriebsweise sollte in kleinen Schritten das Wiedereinschalten der Brenner hinausgezögert, evtl. nur ein Brenner in der wirklich kritischen Zone betrieben werden.

Eine vollständige Neukonstruktion der Gießrinne mit Abdeckung und alternativen Warmhaltemethoden ohne offene Flammen sollte durch Fachfirmen überprüft werden. Schätzwerte für die erreichbaren Einsparpotenziale sind in Tabelle 6-17 wiedergegeben.

Tabelle 6-17: Varianten zur Beheizung einer Gießrinne

Variante	Einheit	Ausgangszustand	Brennereinschaltzeit halbieren	Einhausung und alternative Beheizung
Investition	€	-	minimal	> 100 000 (Schätzung)
Leistung (gemittelt)	kW	ca. 500	ca. 250	< 100
Energiebedarf	MWh/a	1 350	675	< 270
Jährliche Energiekosten (Preisbasis 0,03 €/ kWh)	€	40 500	20 250	8 100

Je nach gewünschter Amortisationszeit sind für die Maßnahmen Zielkosten von ca. 100 000 – 150 000 € möglich.

6.4.3 Einzeluntersuchungen zum Energieverbrauch der induktiven Schmelzöfen

Um den tatsächlichen energetischen Unterschied der beiden Ofentypen im Alltagsbetrieb herauszuarbeiten, werden 8 Schmelzöfen einer genaueren Analyse unterworfen. Der Schmelzzyklus an einem einzelnen Elektroschmelzofen besteht aus einer Abfolge von Prozessschritten (Abbildung 7-3). Die Zyklusdauer ist u.a. abhängig vom Ofentyp und dem Schmelzgut. Sie beträgt ca. 90 min +/- 15 min.

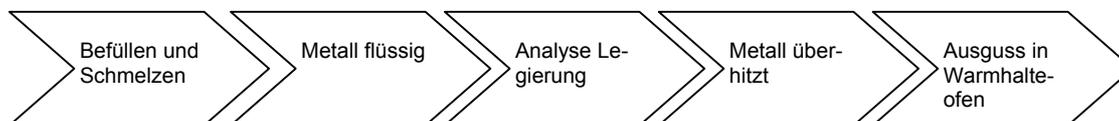


Abbildung 6-15: Abfolge der Prozessschritte bei einem Schmelzzyklus an einem Elektroschmelzofen

Der spezifische Energieverbrauch ist dabei nicht nur vom elektrischen und thermischen Wirkungsgrad des Schmelzofens, sondern auch von der Zykluszeit und insbesondere von den „Nebenzeiten“ (Analysezeiten, Wartezeiten etc.) abhängig. Die hier wiedergegebenen spezifischen Kennzahlen beziehen sich auf das eingeschmolzene Material und nicht etwa auf den „guten Guss“. Der Krätzeanfall und der Abbrand (ca. 4 %) sind bei der Berechnung des spezifischen Energieverbrauchs nicht explizit berücksichtigt.

Die Ergebnisse zweier Messkampagnen der Jahre 2003 und 2004 sind in Tabelle 6-18 dargestellt:

Die beiden Induktionsöfen 12 und 15 arbeiten erwartungsgemäß sehr effizient mit nur geringen Abweichungen vom Branchenstandard von 225 kWh_{el}/t. Damit wird ein Wirkungsgrad von etwa 80 % realisiert.

Tabelle 6-18: Spezifische Energieverbrauchswerte von Tiegel- und Rinnenöfen

Ofen Nr./ Ofentyp*	Einheit	11 T	12 R	13 T	14 T	15 R	16 T	17 T	18 T
spez. Stromverbrauch ('03)	kWh _{el} /t	340	220	325	325	220	320	355	330
spez. Stromverbrauch ('04)	kWh _{el} /t		229	373	310	250		365	
Branchenwerte (von/bis)	kWh _{el} /t	270 320	225	270 320	270 320	225	270 320	270 320	270 320
Min. theor. Schmelzenergie	kWh _{el} /t	180	180	180	180	180	180	180	180

alle Werte gerundet

*) T = Tiegelofen R = Rinnenofen

Für die Induktions-Tiegelöfen ergeben sich mit 320 bis 355 kWh_{el}/t zwar wesentlich höhere Energieverbrauchswerte. Diese liegen bis auf den Ofen 17, der erkennbar schlechtere Werte aufweist, leicht über den Branchenwerten für Messingspäne (320 kWh_{el}/t), entsprechend einem Wirkungsgrad von 49 bis 55 %.

6.4.4 Gesamtenergiebilanz eines mit Spänen beschickten Schmelzofens

Die energetische Gesamtbilanz an einem Induktions-Tiegelofen für Messingspäne (Ofen 13) wird anhand der in einem Schmelzzyklus erfassten zu- und abgeführten Energieströme gebildet. Bei der nachfolgenden Darstellung wird die Brennstoffenergie der „Spänefeuchte“ explizit mitberücksichtigt. Das Ergebnis wird auf die erschmolzene Tonne Messing bezogen.

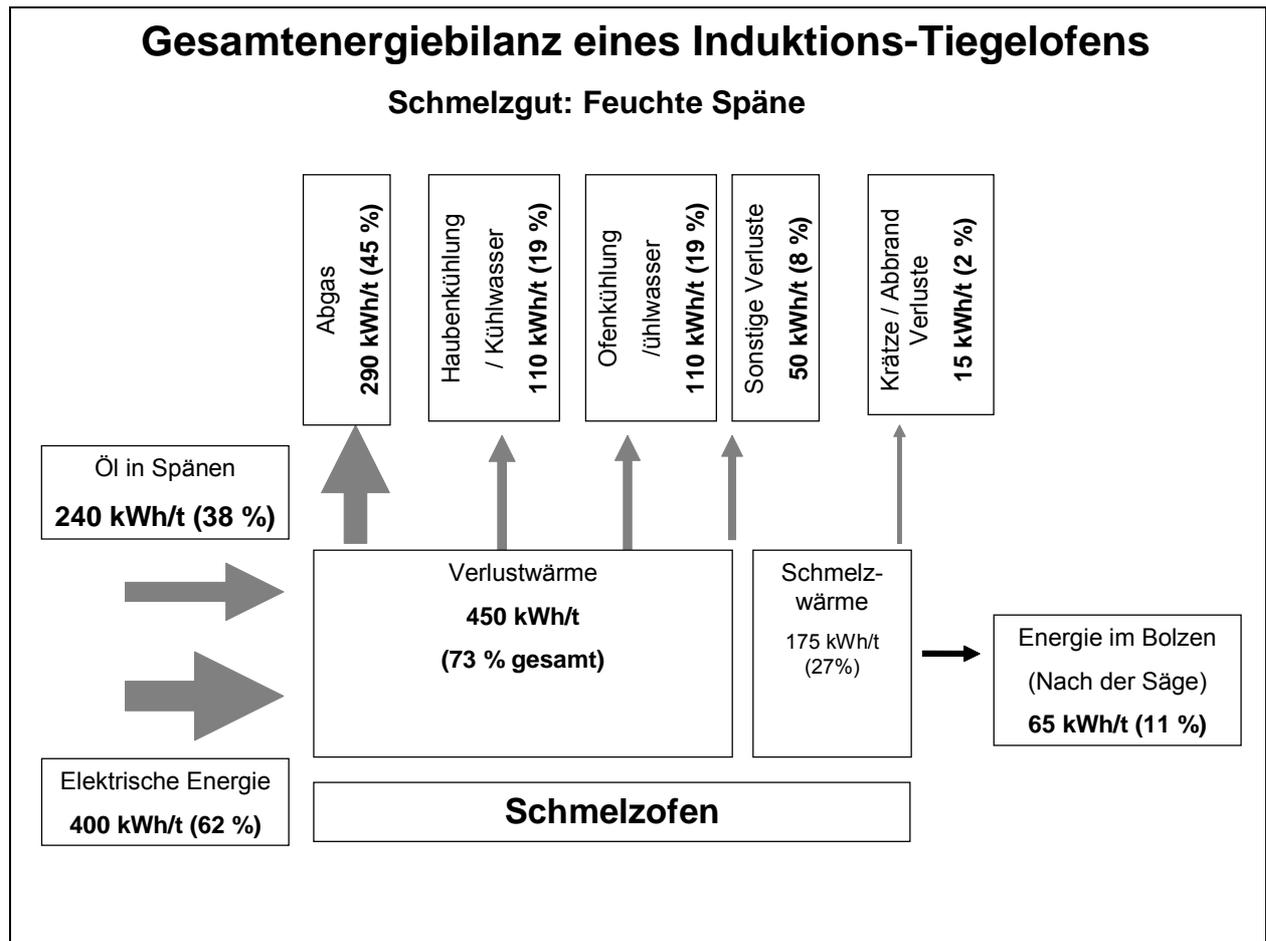


Abbildung 6-16: Gesamtenergiebilanz an einem mit Spänen beschickten Induktions-Tiegelofen

Man erkennt unmittelbar, dass die über die „feuchten“ Späne zugeführte Energie nicht zur Aufheizung der Späne oder der Schmelze beiträgt. Im Abgas findet sich deren Energie komplett wieder. Das deckt sich mit der Beobachtung, dass die „Feuchte“ oberhalb der Schmelzoberfläche als Stichflamme verbrennt.

Es kann zu Vergleichszwecken sinnvoller sein, die Heizenergie des den Spänen anhaftenden Öles außer Acht zu lassen und die Bilanzwerte auf die zugeführte elektrische Energie zu beziehen. Damit erhält man einen Wirkungsgrad des untersuchten Tiegelofens von 44 %. Hierbei wurden Verluste infolge Krätzeanfall und Abbrand mit 4 % explizit berücksichtigt.

6.4.5 Warmhaltebetrieb der Schmelzöfen über längere Stillstände

Über das Wochenende werden die Schmelzöfen im Warmhaltebetrieb gefahren. Die Energieverbrauchswerte zweier Induktions-Tiegelöfen für eine längere Warmhalteperiode zeigt Tabelle 6-19.

Tabelle 6-19: Energieverbrauchswerte der Induktionstiegelöfen 16 und 18 über eine längere Warmhalteperiode

Ofen	Energieverbrauch [kWh]	Durchschnittliche Leistung [kW]	Stillstandsdauer [h]
Ofen 16	2 030	74	27
Ofen 18	1 574	57	27,5

Die Leistung der Einzelöfen liegt mit 60 – 75 kW relativ hoch (Warmhalteöfen im normalen Produktionsbetrieb z.B. 90 kW). Ursache könnte ein hoher Sumpf, hohe Temperaturen oder unvermeidbare Induktionsverluste bei teilgefüllten Tiegelöfen sein. Die Unterschiede in beiden fast baugleichen Öfen deuten auf ein weiteres (kleines) Einsparpotenzial hin.

Maßnahme: In jedem Fall sollte von Seiten des Betriebes in einer einmaligen Aktion für jeden Ofen separat der optimale Wochenendbetrieb (minimales Sumpfniveau, Mindestleistung) bestimmt werden.

Potenziale und Maßnahmen für die Schmelzöfen

Aus diesen Ergebnissen zum Energieverbrauch der Induktionsschmelzöfen lässt sich – gleich bleibende Technik vorausgesetzt – nur wenig direktes Verbesserungspotenzial an den Öfen erkennen:

Eine deutliche Einsparung ergäbe sich bei Einführung neuer Schmelzofentechnologien, wie z.B. dem Kombischmelzer in Kapitel 5.3.

Tabelle 6-20: Wirtschaftliche Gegenüberstellung bei Einsatz eines Kombischmelzes

Maßnahme		Weiterbetrieb z.B. Gießanlage 1	Ersatz durch Kombischmelzer
Investition	€	-	800 000
Minderung Energieverbrauch	MWh/a	-	3 000
Einsparung Energiekosten (Berechnungsbasis 0,05 €/kWh)	€/a		150 000

Beim Test eines solchen „Kombischmelzers“ im Betrieb A traten Verfahrensprobleme auf (Brände im Filterhaus). Nach dem Beheben anfänglicher Unzulänglichkeiten (z. Zt. läuft eine weitere Pilotanlage in den USA im Probetrieb) sollte diese Alternative zum energieeffizienten Einschmelzen von Spänen (spezifischer Energieverbrauch 220 – 250 kWh_{el}/t nach Angabe des Herstellers) neu überdacht werden.

6.5 Energetische Untersuchungen zur Bolzenerwärmung vor dem Warmumformen

Vor dem Pressen zu Halbzeugen werden im Betrieb A die zwischenzeitlich erkalteten Messingbolzen auf ca. 650 – 700 °C erwärmt. Dazu werden gasbefeuerte Wiederaufwärmeöfen unterschiedlicher Technologien eingesetzt. Im Weiteren wird ein moderner Ofen (Hersteller C.O.I.M, Baujahr 1997) mit einem Schnellerwärmungsöfen (Hersteller Junker, Alter über 30 Jahre) energetisch verglichen.

Die so genannte „C.O.I.M“-Anlage besteht aus zwei baugleichen parallel angeordneten 35 m langen erdgasbeheizten Öfen. Die Verbrennungsluft der seitlich angeordneten Brenner wird über einen separaten Rauchgaswärmetauscher vorgewärmt. Der Brennerabstand verringert sich vom Bolzeneintritt zum -austritt hin stetig (siehe Abbildung 6-17), die größte Brennerdichte befindet sich im Bereich der höchsten Bolzentemperatur. Der Bolzenaustritt ist mittels Klappe verschlossen und öffnet nur kurzzeitig zum Auswurf.

Das heiße Rauchgas strömt im Gegenstrom zu den aufzuwärmenden Bolzen in Richtung des Kamins und wärmt die kühleren Bolzen auf. Die im Rauchgas enthaltene Energie wird dadurch zum Teil wieder genutzt.

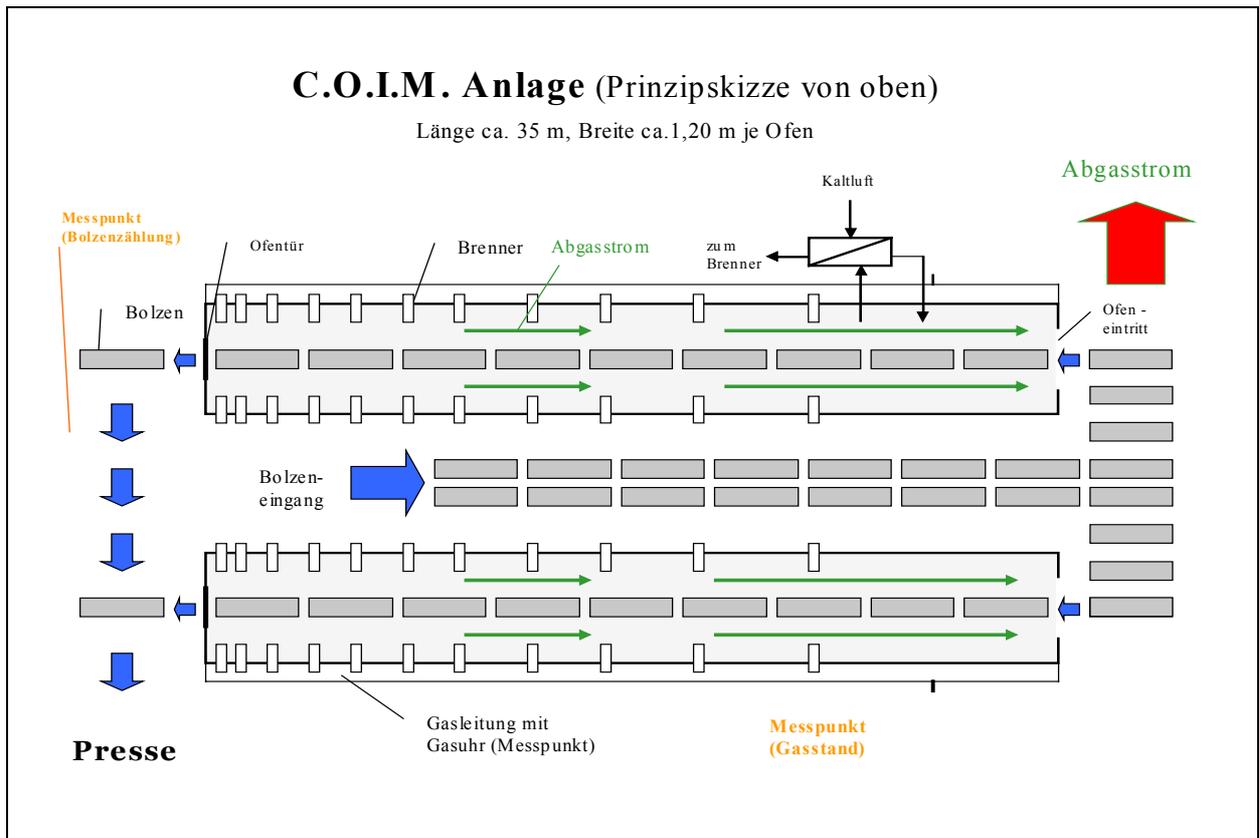


Abbildung 6-17: Prinzipdarstellung des Wärmeofens Typ C.O.I.M.

Für diesen Ofen wurde eine Energiebilanz für den kontinuierlichen Betrieb (ohne Stillstände, ohne An- bzw. Abfahren) erstellt (Abbildung 6-17). Der gemessene Wirkungsgrad liegt etwa bei 62 %.

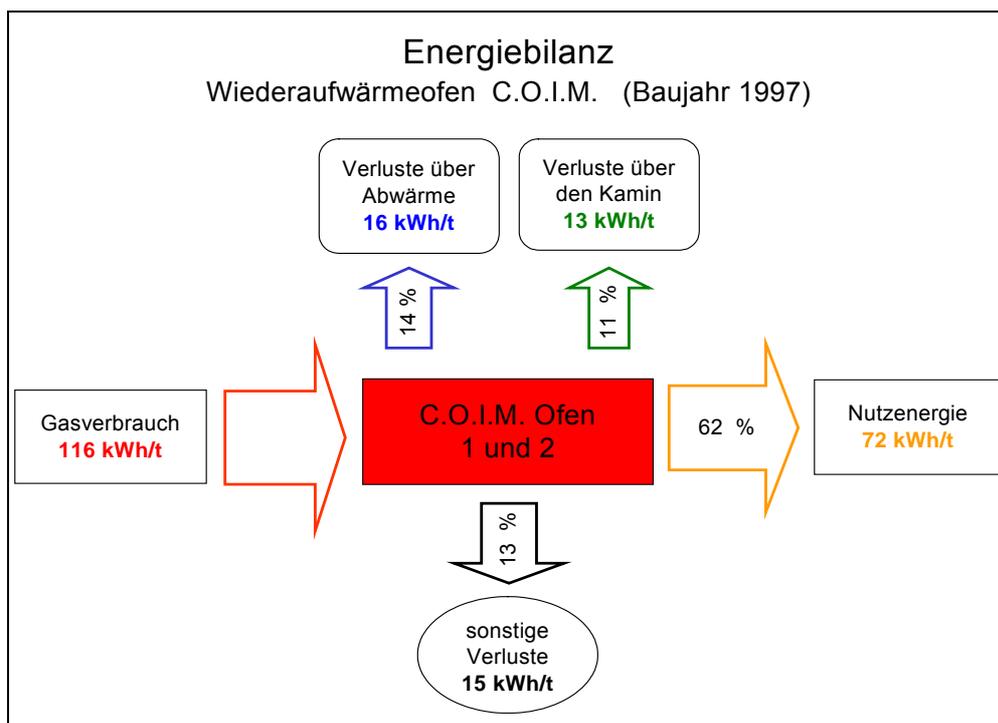


Abbildung 6-18: Energiebilanz des Wärmeofens vom Typ C.O.I.M.

Der Junker Schnellaufwärmeofen (alte Bauart)

Auch dieser Aufwärmeofen ist gasbeheizt (Abbildung 6-19). Er ist geometrisch deutlich kürzer als der „C.O.I.M.“-Ofen, kann Bolzen bis 850 °C erwärmen und hat einen theoretischen Bolzendurchsatz von 80 Bolzen (0,33 m Länge) pro Stunde. Die 150 Gasbrenner sind gleichmäßig über die Ofenlänge verteilt.

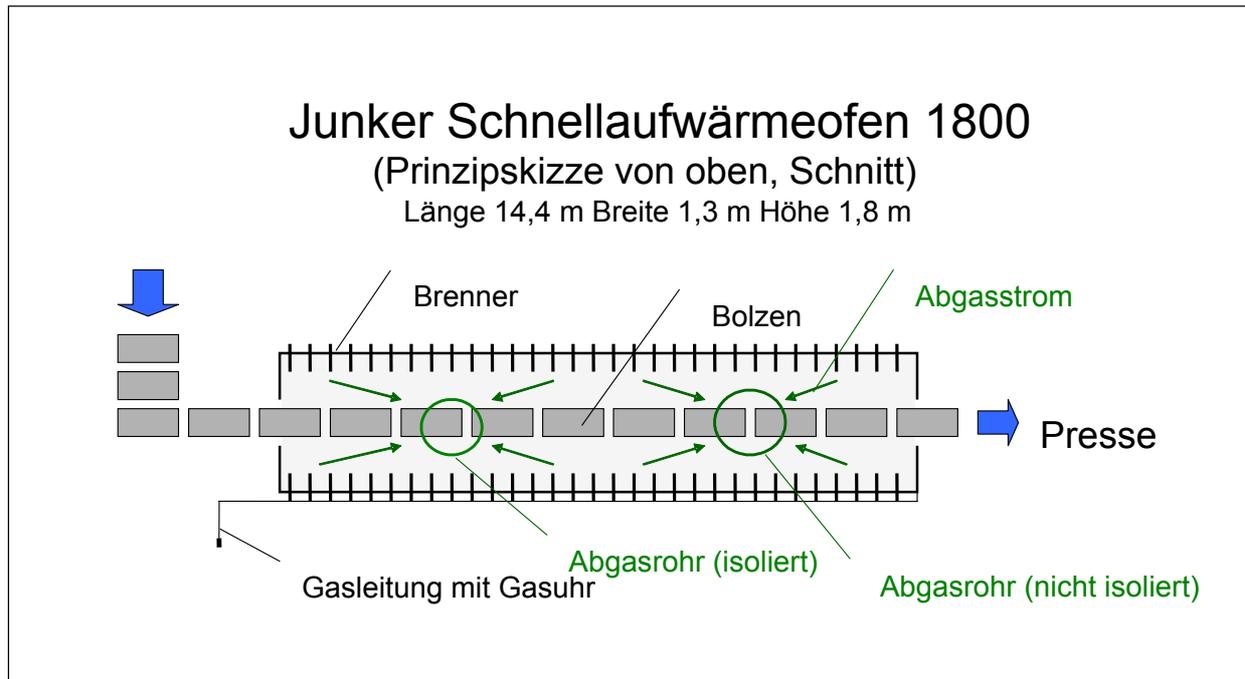


Abbildung 6-19: Darstellung des Wärmeofens Typ Junker (alte Bauart)

Das Rauchgas strömt auf sehr kurzem Weg in die beiden Abgaskamine, eine effektive Vorwärmung der kalten Bolzen mit dem Rauchgas wie beim „C.O.I.M.“ Verfahren findet hier nicht statt. Gleiches gilt für die Vorwärmung der Verbrennungsluft der Brenner.

Alle diese – aus energetischer Sicht – ungünstigen Ofeneigenschaften und Betriebsbedingungen führen zu einer erheblichen Verschlechterung der Energieausnutzung in diesem Ofen. Nur noch 12 % der zugeführten Energie finden sich als Nutzenergie in den heißen Bolzen wieder.

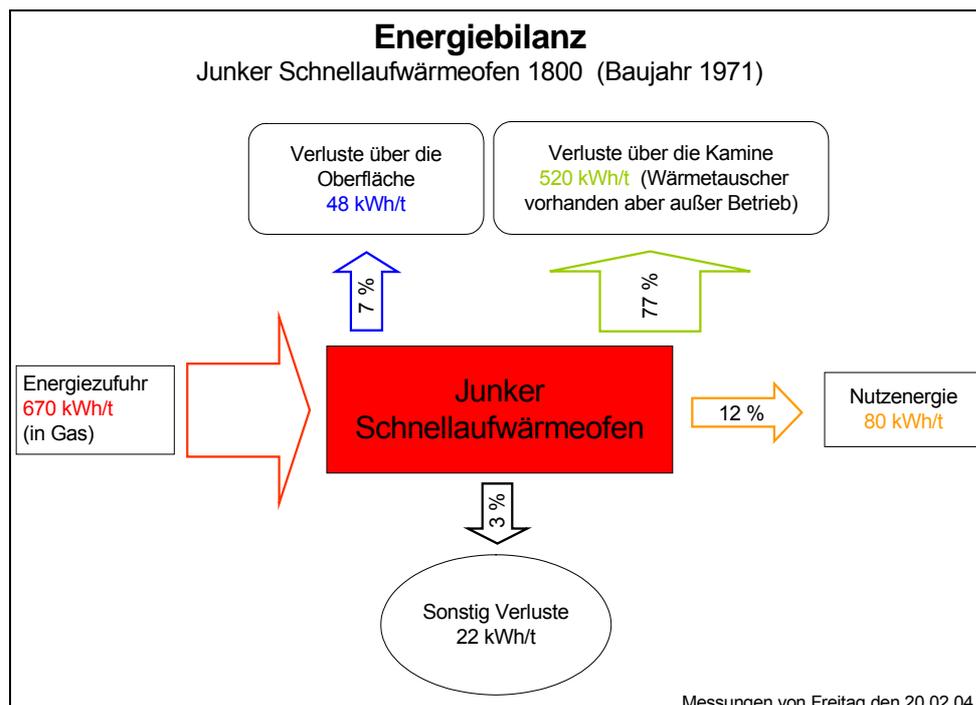


Abbildung 6-20: Energiebilanz des Wärmeofens vom Typ Junker (alte Bauart)

Maßnahmen und Energieeinsparpotenzial

Der nach dem Stand der Technik konstruierte C.O.I.M.-Ofen (Bolzen und Rauchgas im Gegenstrom, ausreichende Erwärmungslängen, Vorwärmung der Verbrennungsluft, gute Isolierung etc.) benötigt nur 20 % der spezifischen Energie des so genannten Junker-SchnellerwärmungsOfens in

Abbildung 6-19. Die Wärmerückgewinnung eines Teils der verbrauchten Heizenergie aus dem heißen Rauchgas kann als Sekundärmaßnahme diese hohen Energieverluste durch veraltete Technik nur zu einem sehr kleinen und sehr unbefriedigenden Anteil wettmachen. Vor allem da die Praxis zeigt, dass solche Wärmerückgewinnungsanlagen nur durch hohen Instandhaltungsaufwand in funktionsbereit gehalten werden können und daher häufig außer Betrieb sind.

In der nachfolgenden Tabelle 6-21 ist die Energie- und Kosteneinsparung bei Ersatz eines veralteten ErwärmungsOfens bei angenommenen 10 000 t Durchsatz pro Jahr berechnet.

Tabelle 6-21: Energie und Kosteneinsparung bei Ofenersatz

Maßnahme	Weiterbetrieb vorhandenen Öfen	Ersatz eines Erwärmungsöfen Typ Junker (10 000 t/a)
Investition	-	nicht bekannt
Energieeinsparung/a	-	5 500 MWh (gas)
Kosteneinsparung/a (Berechnungsbasis 0,03 €/kWh)	-	16 5000 €/a

7 Wärmeauskopplung und Abwärmenutzung

Trotz großer Anstrengungen zur Erhöhung der Energieeffizienz treten erhebliche Abwärmeströme, also Wärmeverluste auf. Es gilt diese Wärme auszukoppeln und einem neuen Prozess zuzuführen.

7.1 Abwärmeströme an Schmelz- und Warmhalteöfen

Abbildung 4-4 zeigt, dass an einem brennstoffbeheizten Ofen folgende Verluste vorhanden sind:

1. Abgaswärmestrom $Q_{A,2}$:

Die größte Verluststrom ist im Abgas enthalten. Die Abgastemperatur hängt von der Ofenbauart und den eingesetzten Brenner- und Wärmerückgewinnungssystemen ab. In Tiegel- und Einkammer Schmelzöfen treten die höchsten Abgastemperaturen von 900 – 1100 °C auf. Wird das Schmelzgut durch die Abgase vorgewärmt, sinkt die Abgastemperatur auf bis zu 300 °C ab. Bei Einsatz von Rekuperations-Brennern sinkt die Abgastemperatur auf ca. 500 °C bei Regenerationsbrenner auf bis zu 180 °C ab. Der Abgaswärmestrom ist bei nicht voll ausgelasteten Öfen stark schwankend und bei Schacht-, Wannen- und Drehtrommelöfen stark mit Staub und Al_2O_3 belastet.

2. Wand- und Chargierverluste Q_W und $Q_{Chargier}$

Über eine Luft-Erfassungseinrichtung, angebracht oberhalb der Schmelzöfen, werden die Wärmeverluste der Ofenwände und beim Ofenbetrieb erfasst. Erfasst werden zudem die Gase, die durch Abbrand und Verdampfung von Fremdstoffen im Schmelzgut auftreten. All diese Wärmeströme sind sowohl hinsichtlich des Temperaturniveaus als auch zeitlich stark schwankend. Das Temperaturniveau ist der Regel kleiner als 100 °C.

3. Wärmeinhalt der Gussstücke (Nutzwärme Q_{Sch})

Nach dem Gießprozess (Strang-, Druck- oder Kokillenguss) ist im erkaltenden Gussstück noch Wärme enthalten. Die Temperatur der erstarrten Gussstücke liegt beim Verlassen der Gussform

ca. 100 K unter der Schmelztemperatur. Die oftmals dünnwandigen Gussteile kühlen schnell auf die Umgebungstemperatur ab.

Tabelle 7-1: Abwärmeströme, Temperaturniveau und Qualität

Abwärmequelle	Ofen- und Brennertyp	Temperaturniveau [°C]	Qualität
Abgas	alle Ofentypen mit Kaltluftbrenner	900 – 1 100	schwankend, Belastungen durch Staub und Al_2O_3
	alle Ofentypen mit Rekuperatorbrenner	400 – 600	schwankend, Belastungen durch Staub und Al_2O_3
	alle Ofentypen mit Regenerator	180 – 300	schwankend, weniger Staub, Al_2O_3
Abluft über Absaugung	Tiegel, elektrisch beheizte Öfen, Schachtschmelzöfen	40 – 80	stark schwankend, Staub, Öldämpfe, Al_2O_3
Gussstücke	alle Gießprozesse	50 – 300	stark schwankend

7.2 Abwärmenutzung

Für die anfallende Abwärme muss eine wirtschaftliche Nutzung gefunden werden. Für die Nutzung kann folgende Prioritätenliste aufgestellt werden:

1. Nutzung für einen weiteren Wärmebehandlungsprozess
2. Nutzung zur Heizungsunterstützung /3/4/7/
3. Sondernutzung, z.B. Verstromung der Abwärme (Dampfmaschine /44/, ORC-Prozess /43/, oder Stirling-Motor)

Für die Abwärmenutzung ist zu prüfen:

- ob das Temperaturniveau der Abwärme höher als die erforderliche Prozesstemperatur der Wärmenutzung ist
- ob eine zeitliche Übereinstimmung zwischen Wärmeangebot und Nachfrage besteht
- und ob Abwärmequelle und Wärmenutzung eng beieinander liegen.

Für die Wärmeauskopplung werden handelsübliche Abgaswärmetauscher der Firma Bomat eingesetzt. Als Wärmeträger dient Wasser oder Thermoöl.

7.2.1 Abwärmepotenzial im Abgas

Die nutzbare Abwärme in einem Abgasstrom hängt von der Abgastemperatur vor und nach dem Wärmetauscher ab und kann aus Abbildung 7-2 abgeleitet werden.

Beträgt z.B. die Eintrittstemperatur vor dem Wärmetauscher 500 °C und nach dem Wärmetauscher noch 200 °C, so ist im Abgaswärmestrom eine mittlere spezifische Wärmemenge von $5,2 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{m}^3_{\text{n,Br}}$ pro Normkubikmeter Brenngas nutzbar. Bei einer Brennerleistung von 300 kW können ca. 150 kW Abwärmeleistung genutzt werden.

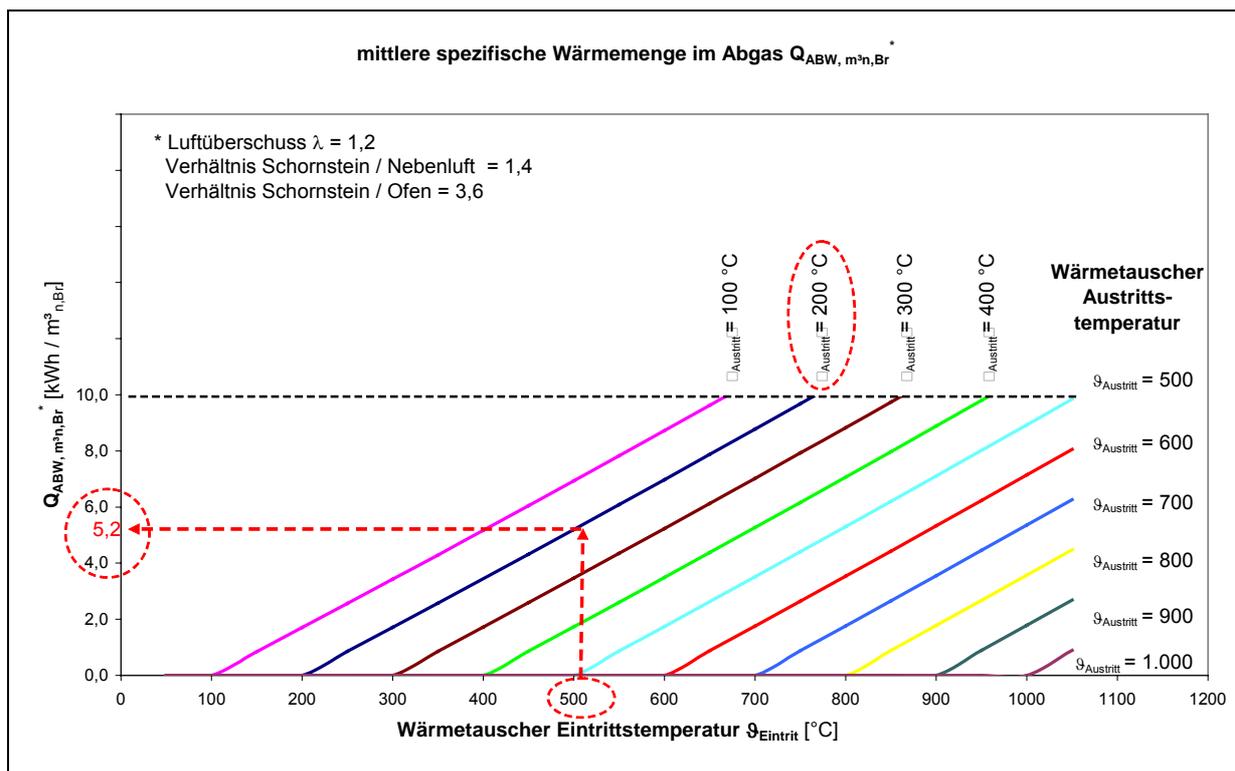


Abbildung 7-1: Nomogramm zur Bestimmung der nutzbaren Abwärme im Abgasstrom Wärmetauscheraustritts-temperatur 200 °C

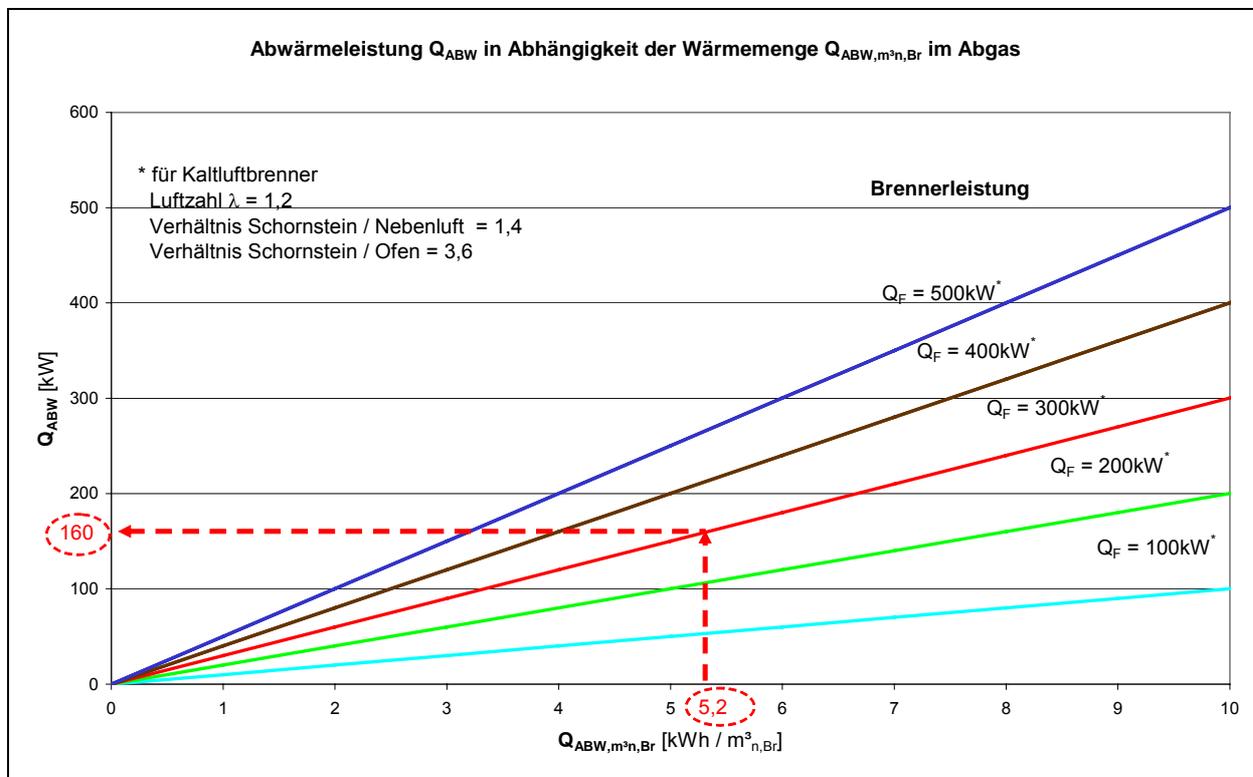


Abbildung 7-2: Nomogramm zur Bestimmung der nutzbaren Abwärme im Abgasstrom, Brennerleistung 300 kW

7.3 Praxisbeispiel 1: Abwärmepotenzial und Nutzung im Betrieb C

Die Abwärmenutzung wird anhand von drei Praxisbeispielen gezeigt:

1. Schmelzbetrieb mit Tiegelöfen
2. Schmelzbetrieb mit Schachschmelzöfen
3. Schmelzbetrieb mit Induktions-Schmelzöfen

Im Betrieb C werden zahlreiche Stand- und Kipptiegel mit Kaltluftbrennern betrieben. Vor ca. 25 Jahren installierte Systeme zur Wärmeauskopplung aus dem Abgas und Nutzung zur Heizungsunterstützung sind seit mehreren Jahren außer Betrieb.

Das Nutzungspotenzial der Abwärme im Abgas, der Heizwärmebedarf und die Wirtschaftlichkeit einer neu zu installierenden Anlage zur Abwärmenutzung werden nachfolgend untersucht.

7.3.1 Abgaswärmeströme an den Tiegelöfen

Die Abgastemperaturen werden für zwei Ofengruppen erfasst:

1. Sandguss mit 4 Standtiegel (à 200 l), angeschlossen an einen Kamin
2. allg. Schmelzerei mit 2 Kipptiegeln (à 600 l), angeschlossen an einen Kamin

Die Messwerte für den Bereich der Kipptiegel zeigt Abbildung 7-3.

Es stellen sich Abgastemperaturen von 270 °C (ein Ofen im Betrieb), und ca. 400 °C (zwei Öfen im Betrieb) ein.

Es sind hier 2 Kipptiegelöfen angeschlossen. Die Abgastemperaturen beim Austritt aus den Öfen betragen ca. 1 500 °C. Durch die Ansaugung von Nebenluft wird die Abgastemperatur stark abgekühlt.

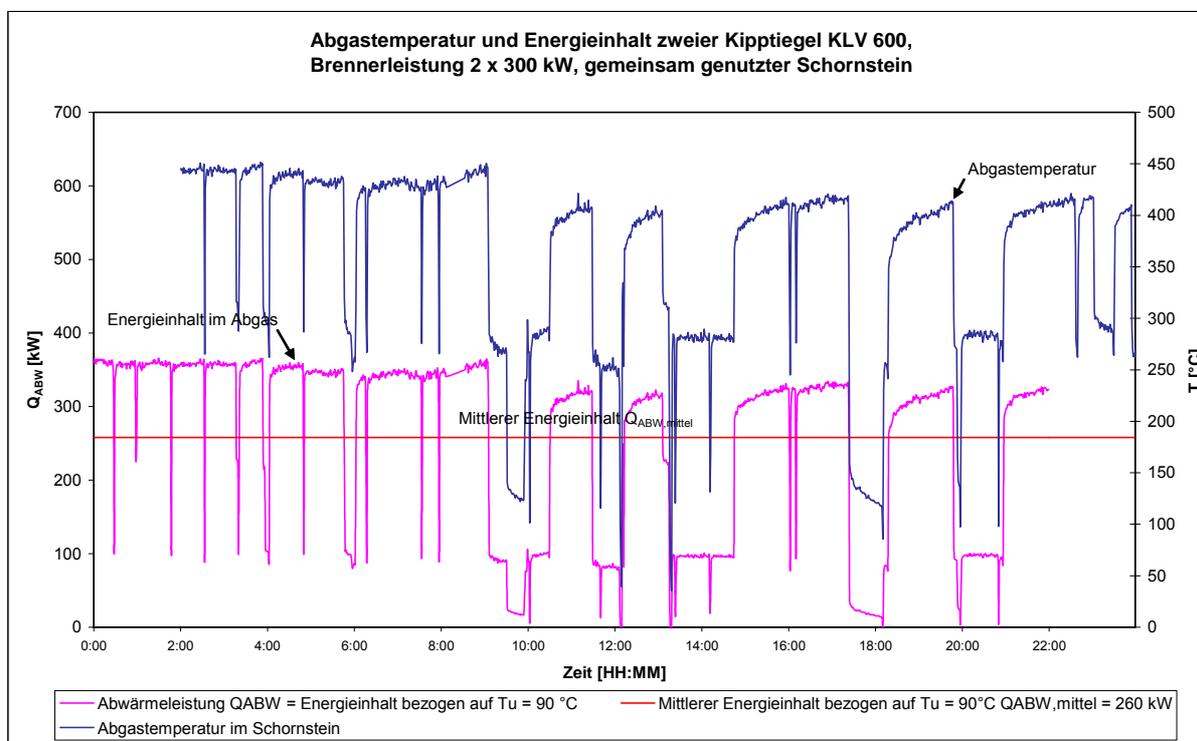


Abbildung 7-3: Abgastemperatur und Energieinhalt zweier Kipptiegel KLV 600, Brennerleistung 2 x 300 kW, gemeinsam genutzter Schornstein

Wird das Abgas in einem Luft/Wasser-Wärmetauscher auf ca. 90 °C abgekühlt, so steht an dem untersuchten Doppel-Schmelzöfen eine mittlere Leistung von 260 kW zur Verfügung.

Tabelle 7-2: Nutzbares Abwärmepotenzial

Bereich	$Q_{ABW,mittel}$ [kW]	jährlicher * Energieinhalt ** im Abgas [MWh/a]
Schmelzerei	260	1620
Sandguss	245	1530

* Der Berechnung liegt ein Arbeitsjahr mit 260 Tagen und drei Schichten pro Tag zu Grunde
 ** Die Bezugstemperatur für die Wärmeauskopplung $T_u = 90\text{ °C}$

Aus dem Abgas der Kipptiegel sind jährlich ca. 1 220 MWh Wärme bei 90 °C auszukoppeln.

Die verfügbare Leistung schwankt stark. Leistungswechsel treten im Abstand von ca. 1 Stunde auf. Diese Wechsel hängen direkt mit dem Betrieb der Brenner zusammen. Eine kontinuierliche Wärmelieferung ist nicht zu erwarten.

7.3.2 Wärmebedarf der Heizung und Warmwasserversorgung

Um den Wärmebedarf zur Beheizung und Warmwasserversorgung des Unternehmens zu ermitteln, werden die Temperaturverläufe in der Fernwärmezentrale über einen längeren Zeitraum aufgezeichnet. Der Wärmebedarf der einzelnen Gebäudeteile wird zusätzlich nach dem Hüll-Verfahren berechnet /24/.

Das Ergebnis dieser Auswertung ergibt den Leistungsbedarf der Fernwärmezentrale zur Gebäudeheizung und Warmwasserversorgung (Abbildung 7-4). Es zeigt sich, dass die rechnerische Spitzenlast 361 kW beträgt. Zudem zeigt sich in der Heizperiode eine nicht unerhebliche Grundlast. Der mittlere Leistungsbedarf zur Warmwasserversorgung ist mit 12 kW unbedeutend klein.

Bei einer Grundlast von 100 kW könnten in einem typischen Jahr 670 MWh_{th} bei 200 kW ca. 1 100 MWh_{th} eingespart werden. Die Schmelzöfen werden lediglich an Werktagen betrieben. Die tatsächlich ersetzbare Heizenergie beträgt daher 480 MWh/a bzw. 780 MWh/a. Der Jahresheizwärmebedarf beträgt 1 543 MWh/a.

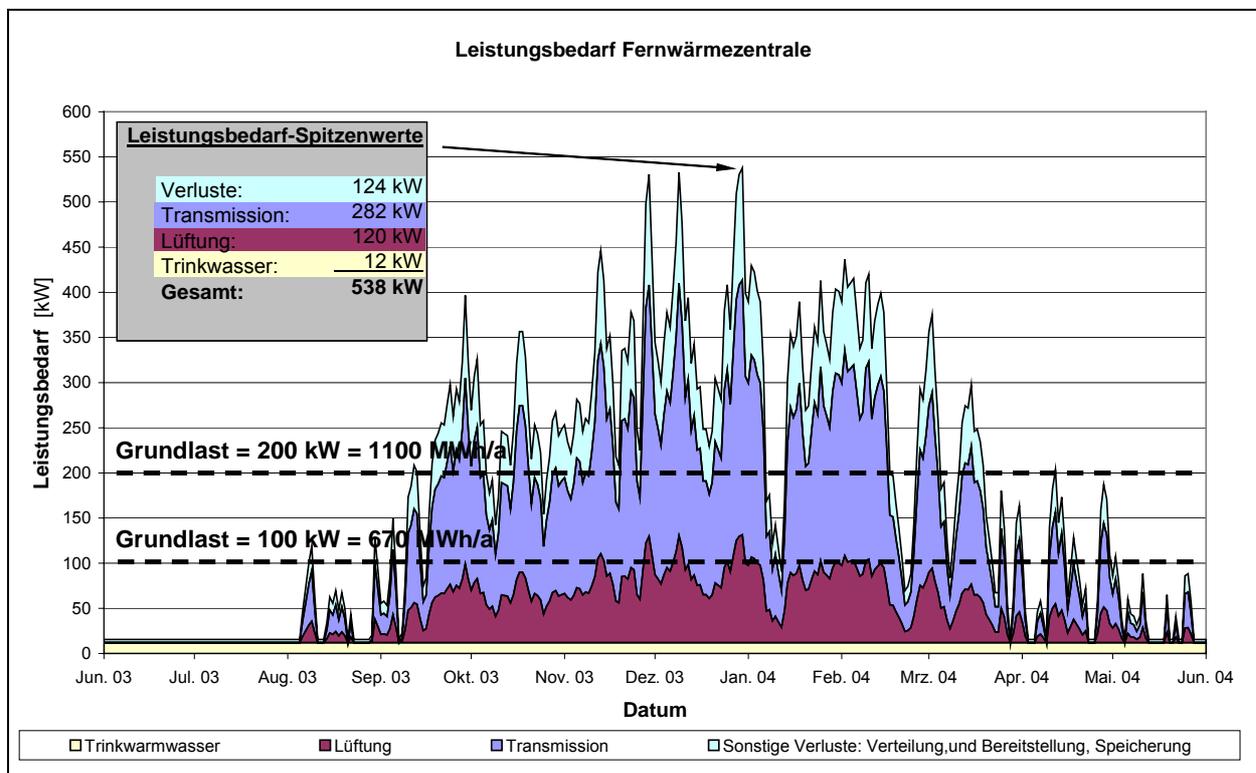


Abbildung 7-4: Errechneter Leistungsbedarf zur Heizungsunterstützung und Warmwasserversorgung

7.3.3 Konzept zur Abwärmeauskopplung

Auf Grund der Höhe des Energie- und Leistungsbedarfs wird vorgeschlagen, eine Grundlast von 100 kW bzw. 200 kW durch die Abwärme der Schmelzöfen abzudecken.

Um die Wärme auszukoppeln, wird ein Abgaswärmetauscher (Abgas/Wasser) eingesetzt und dieser an die Fernwärmezentrale angebunden. Für die Installation am Schornstein sollte der Schmelzplatz gewählt werden, der die höchste Auslastung besitzt. Nur dann ist ein wirtschaftlicher Betrieb möglich.

Die beiden Kippiegel KLV 600 im Bereich Schmelzerei haben eine sehr hohe Auslastung und speisen gemeinsam einen Kamin. Deshalb wird vorgeschlagen, die Abwärmenutzung an diesen Tiegeln zu realisieren. Der Schornstein dieses Schmelzplatzes besteht im Wesentlichen aus einem Stahlrohr, an dem leicht bauliche Veränderungen vorgenommen werden können.

Die Wärme im Abgas wird mit Hilfe eines Abgaswärmetauschers ausgekoppelt. Dabei wird ca. 300 °C heißes Abgas im Gegenstrom über einen wasserdurchströmten Wärmetauscher gesaugt. Das Abgas kühlt sich dabei ab und erwärmt das Wasser auf ca. 80 °C.

Nach Herstellerangaben (Fa. BOMAT) muss die Abgastemperatur konstant bei 300 °C gehalten werden und sollte keinen größeren Schwankungen unterliegen. Dies wird über eine motorgesteuerte Klappe realisiert, die bei zu hohen Abgastemperaturen öffnet und den Fremdluftanteil weiter erhöht.

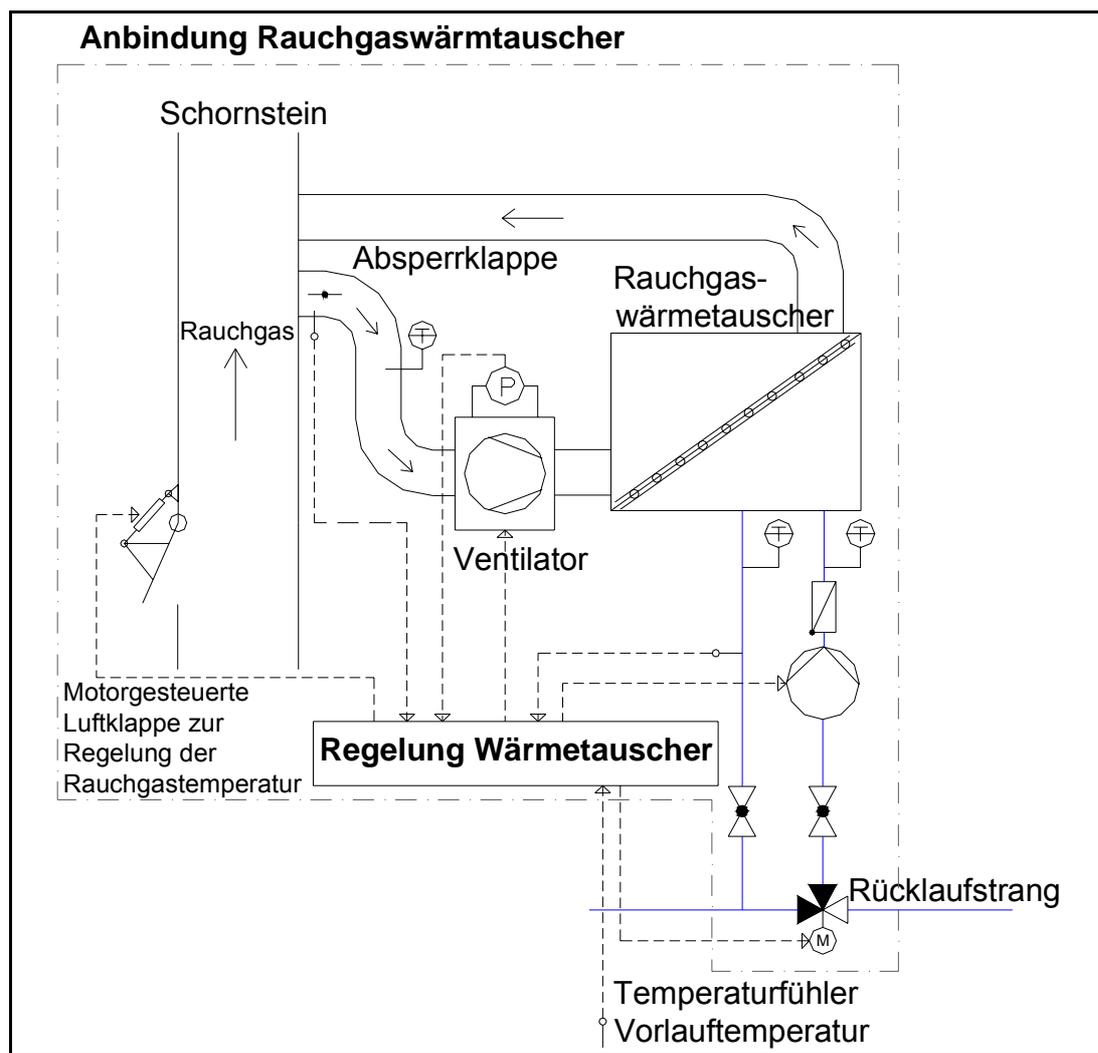


Abbildung 7-5: Anbindung des Abgaswärmetauschers an den Kamin

Diese Art der Auskopplung eignet sich ideal zur Anbindung an ein Heiznetz, da das heiße Wasser direkt in einen vorhandenen Heizkreis eingespeist werden kann (siehe Abbildung 7-5).

Es wird vorgeschlagen, die mit dem Abgaswärmetauscher ausgekoppelte Wärme zur Anhebung der Rücklauftemperatur in der Fernwärmezentrale zu nutzen.

Durch die Einbindung des Abgaswärmetauschers in den Rücklaufstrang des Heiznetzes in der Fernwärmezentrale kommt die ausgekoppelte Wärme allen angeschlossenen Verbrauchern des Heizungssystems gleichermaßen zugute.

Ist die Rücklauftemperatur nach der Anhebung zu gering (z.B. durch die Anzahl oder den Wärmebedarf von Verbrauchern), öffnet das Dreiwegeventil und lässt das Heizwasser über den Fernwärme-Wärmetauscher strömen. So wird sichergestellt, dass immer genügend Wärme zur Verfügung steht und der Abgaswärmetauscher optimal ausgenutzt wird (siehe Abbildung 7-6).

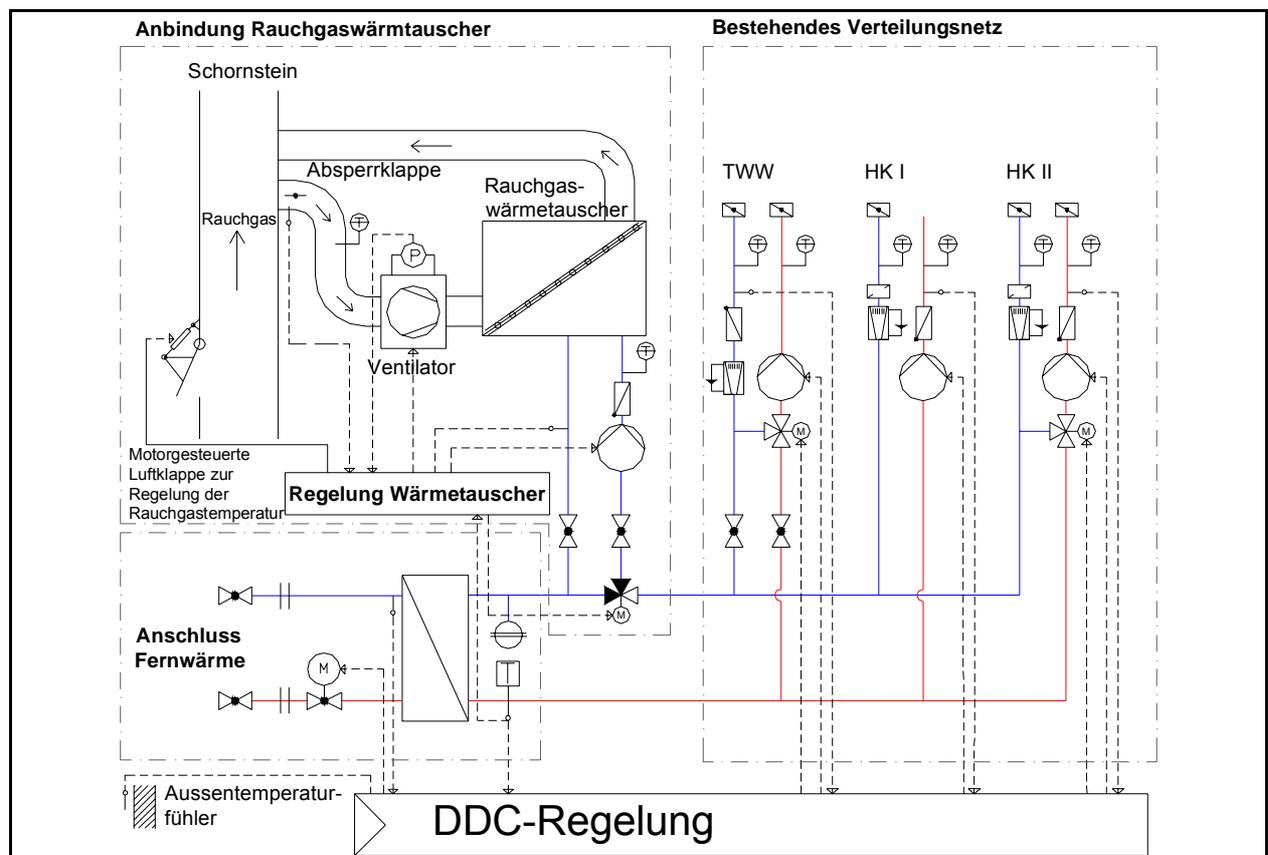


Abbildung 7-6: Einbindung der Abgaswärmetauscher in das Heiznetz im Bereich der Fernwärmezentrale

7.3.4 Investitionskosten und Wirtschaftlichkeit

Untersucht werden zwei Varianten (siehe Tabelle 7-3)

- Var. 1: Auskopplung von 1 x 100 kW (1 Abgaswärmetauscher)
- Var. 2: Auskopplung von 2 x 100 kW (2 Abgaswärmetauscher)

Die Investitionskosten für die Wärmetauscher basieren auf Herstellerangaben. Die Installationskosten sind geschätzt.

Für die Fernwärme werden ca. 42 €/MWhth verrechnet. In einem Jahr betragen die Heizungskosten ca. 63 000 €.

Am wirtschaftlichsten stellt sich die Variante 1 dar. Mit einer geschätzten Investition von 67 000€ können ca. 479 MWh/a Fernwärme eingespart werden. Die Kostenersparnis beträgt ca. 17 000 €/a.

Die CO₂-Reduktion beträgt 124 t/a.

Die Amortisationszeit liegt bei ca. 3,7 Jahren. Werden 200 kW ausgekoppelt, so beträgt die Amortisationszeit 4,6 Jahre (Werte gerundet).

Tabelle 7-3: Wirtschaftlichkeitsberechnung zur Wärmeauskopplung an den Tiegelöfen

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung		Ist-Zustand	Variante 1	Variante 2
Investitionskosten (geschätzt)			100 kW	2 x 100 kW
Abgaswärmetauscher	[€]		43.000	86.000
Installation	[€]		10.000	20.000
Einbindung	[€]		11.250	22.500
Summe Investitionskosten	[€]		64.250	128.500
Verbrauchsgebundene Kosten				
Wartungskosten pro Jahr	[€/a]	500	1.606	3.213
Kosten je MWh		42	42	42
Anteil Grundpreis	[€/MWh]	6	6	6
Anteil Verbrauchspreis	[€/MWh]	36	36	36
Gesamtjahreswärmebedarf	[MWh/a]	1.530	1.530	1.530
Energieeinsparung durch Abwärmenutzung	[MWh/a]	0	480	780
zu beziehende Restwärmemenge	[MWh/a]	1.530	1.050	750
Energiekosten	[€/a]	62.970	45.706	34.901
Energiekosteneinsparung durch Abwärmenutzung	[€/a]	0	17.265	28.070
jährliche Energiekostenreduzierung	[%]	0%	27%	45%
CO ₂ -Emissionen Reduzierung	[tCO ₂ /a]	0	125	203
Statische Amortisationszeit	[a]		3,7	4,6

7.4 Praxisbeispiel 2: Wirtschaftlichkeit der Abwärmenutzung an Schachtschmelzöfen

Die Abwärmenutzung im Schmelzbetrieb mit Schachtschmelzöfen wird näher gezeigt.

7.4.1 Abwärmeströme im Betrieb D

Eine genaue Energiebilanzierung wird ebenfalls für den Betrieb D (Schachtschmelzöfen) durchgeführt. Die aus den Öfen tretenden Abgas- bzw. Abwärmeströme sind in Abbildung 7-7 dargestellt.

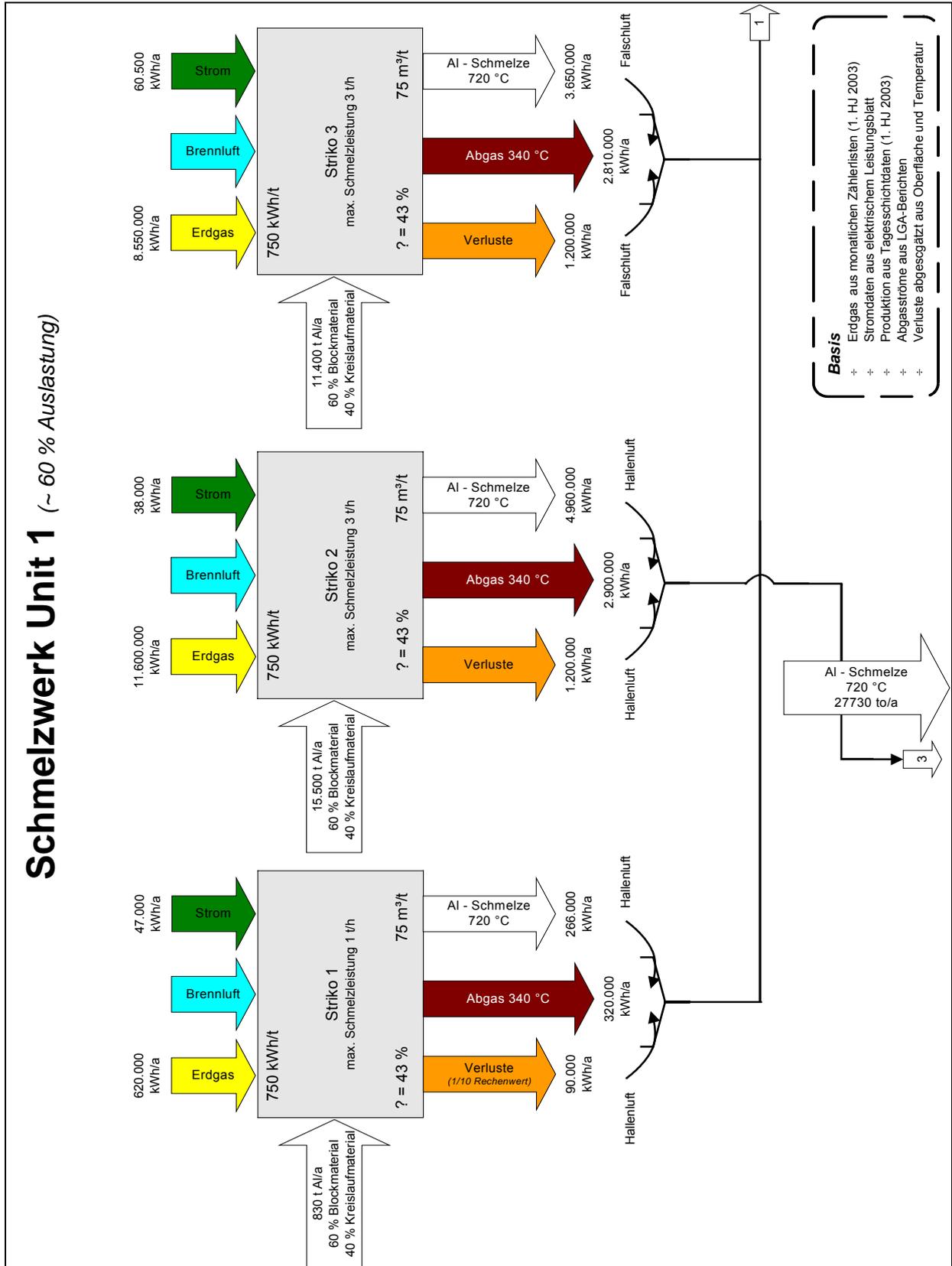


Abbildung 7-7: Energiebilanz des Betriebs D

An zwei Schachtschmelzöfen wird das Rohgas über jeweils eine Haube in die gemeinsame zentrale Abgasleitung abgezogen. Vor den Absaughauben tritt gleichzeitig noch Hallenluft mit in den angesaugten Gasstrom ein Abbildung 7-8.

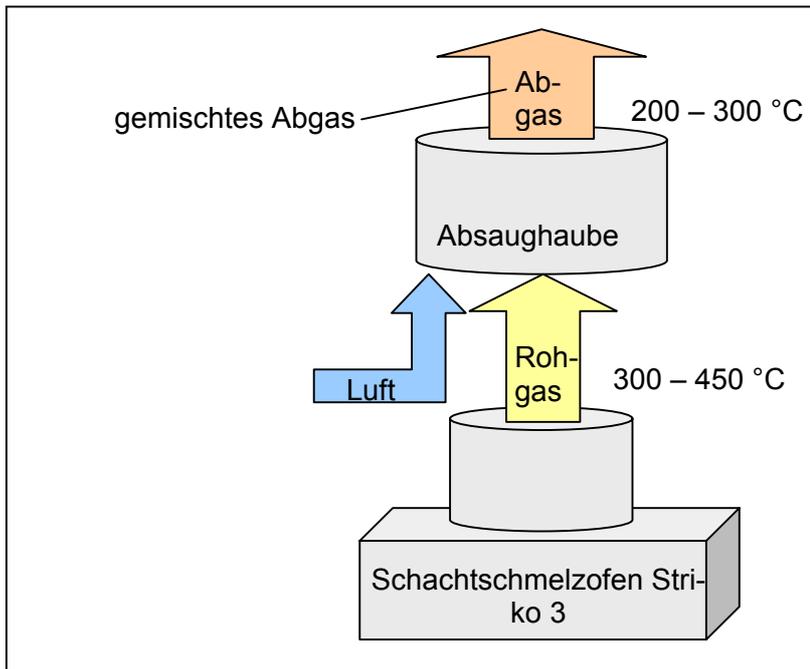


Abbildung 7-8: Vermischung der Hallenluft mit dem Rohgas des Schachtschmelzofens

Aus der diskontinuierlichen Betriebsweise des Schachtschmelzofens resultiert eine zeitlich variierende Wärmeleistung des Abgases. Im Mittel stehen 270 kW_{th} bei einer Temperatur von 200 °C bis 300 °C zur Verfügung (Abbildung 7-9).

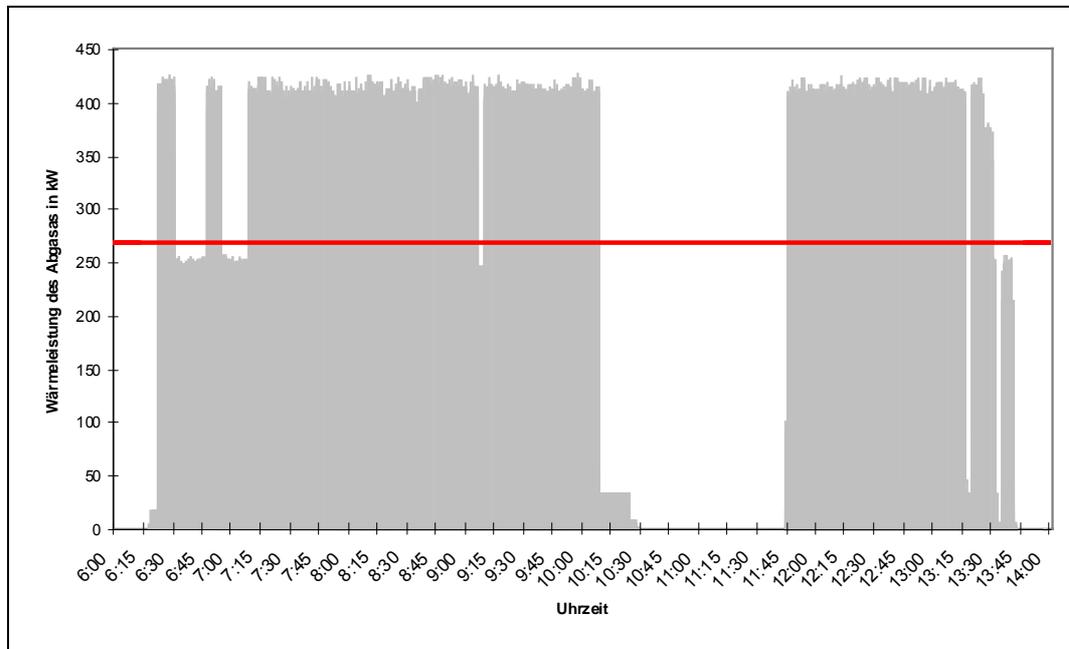


Abbildung 7-9: Variierender Anfall der Wärmeleistung des Abgases

Diese Wärmeleistung entspricht einer äquivalenten Erdgasmenge von 27 m³ Erdgas pro Stunde. Aus der oben ermittelten durchschnittlichen kontinuierlichen Abwärmeleistung von 270 kW resultiert eine jährliche Abwärmemenge 1 860 000 kWh. Diese Abwärme wiederum entspricht einer Wärmemenge, die bei der Verbrennung von 186 000 m³ Erdgas/Jahr oder 15 500 m³ Erdgas/Monat frei werden würde.

Die Abbildung 7-10 zeigt das relativ konstante Abwärmeangebot von 155 000 kWh_{th}/Monat im Vergleich zu dem Heizwärmebedarf im Werk 1 des Betriebs D (82 400 m³ Erdgas/Jahr).

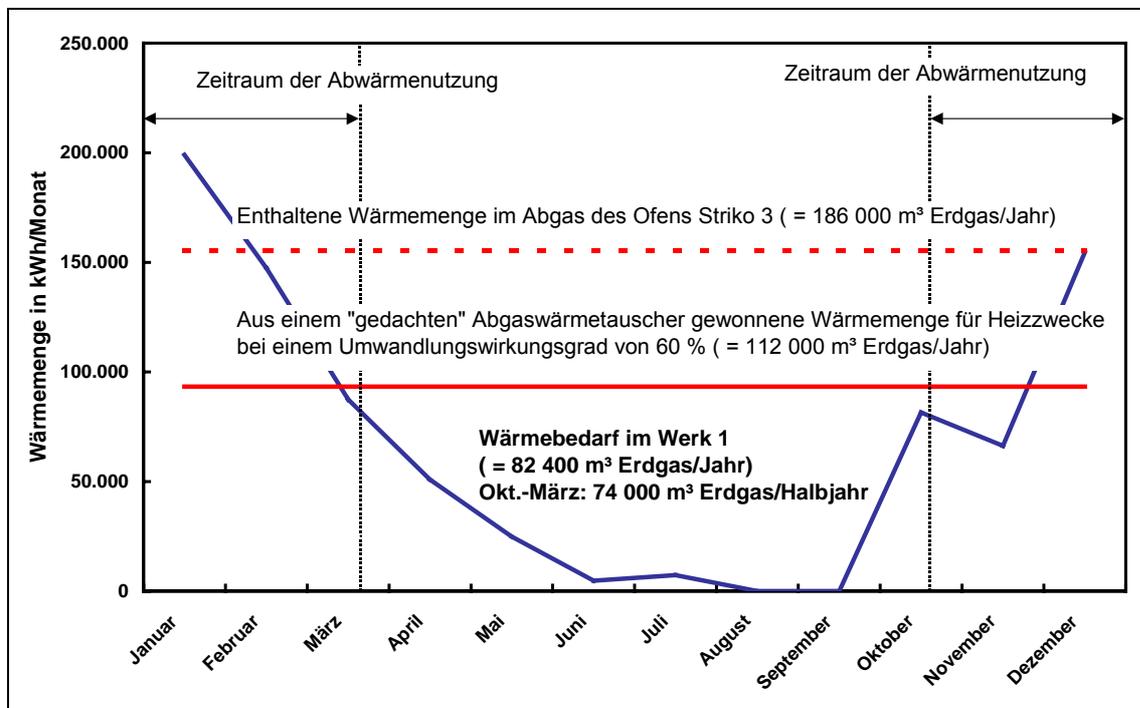


Abbildung 7-10: Wärmemengenbedarf und -angebot

Wegen des täglich schwankenden Wärmeangebot ist im Falle der Abwärmenutzung mittels einer Wärmerückgewinnungsanlage die Integration eines Wärmespeichers zum Ausgleich des Wärmebedarfs und -angebotes zu empfehlen. Hinzu kommt die Notwendigkeit, den Wärmetauscher mit einem Bypass für das Sommerhalbjahr und das Heizungssystem mit einem zusätzlichen Erdgasbrenner für das Winterhalbjahr als Notsicherung auszurüsten.

Die erzielte Einsparung durch den Bau einer Wärmerückgewinnungsanlage zeigt Tabelle 7-4.

Für die Wärmerückgewinnung könnten Rekuperatoren eingesetzt werden. Diese Rekuperatoren würden jedoch mit staubhaltigen und korrosiv wirkenden Abgasen durchströmt. Der Staub könnte mit der Zeit zu abnehmenden Rekuperatorleistungen und Haltbarkeitsproblemen führen. Die Firma Peiler hat sich mit zwei Abgasrekuperatoren, Röhren-Konvektions-Rekuperatoren und Strahlungsrekuperatoren auf diese Anforderungen eingestellt /74/.

Für eine komplett ausgestattete Wärmerückgewinnungsanlage sind Preise zwischen 100 000 und 200 000 € anzusetzen. Die von der Firma Norf bis zum Jahr 1996 angewandte Technik, die Abgaswärme aller Öfen zur Brennluftvorwärmung durch metallische Rekuperatoren zu nutzen wird, aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus (200 – 300 °C) am Schachtschmelzofen Striko 3 nicht empfohlen /73/.

Tabelle 7-4: Jährliche Einsparung durch die Integration einer Wärmerückgewinnungsanlage

	Wärmerückgewinnung zu 100 % (ideal): 930 000 kWh/Halbjahr ¹⁾	Wärmerückgewinnung zu 60 % (realistisch): 560 000 kWh/Halbjahr ¹⁾
	Entsprechende Erdgasmenge 93 000 m ³ Erdgas/Halbjahr ¹⁾	Entsprechende Erdgasmenge 56 000 m ³ Erdgas/Halbjahr ¹⁾
angenommener Gaspreis €/m³	Einsparung pro Jahr €/Jahr	Einsparung pro Jahr €/Jahr
0,30	27 900	16 800
0,40	37 200	22 400

¹⁾ Das Halbjahr entspricht der Heizperiode von Oktober bis März

An den Schachtschmelzöfen ist weiterhin durch die Nutzung der Abgaswärme eine Reduzierung von Kohlendioxidemissionen zu erzielen. Aufgrund der anfallenden Heizmitteltemperatur von ca. 90 °C, den zeitlichen Schwankungen und der thermischen Verluste des Wärmetauschers und der Pufferspeicher sind lediglich ca. 60 % der tatsächlichen Wärme nutzbar.

Diese Wärme könnte für die Heizung und die Warmwasserbereitstellung genutzt werden und müsste nicht mehr zusätzlich durch beispielsweise Gasthermen erzeugt werden. In der nachstehenden Tabelle 7-5 sind die daraus resultierenden Ersparnisse mit Bezug auf Erdgasverbrauch und CO₂-Emissionen aufgezeigt. Die oben durchgeführte Betrachtung der Wirtschaftlichkeit zeigt, dass Einsparungen von 10 000 – 30 000 € zu erwarten sind.

Tabelle 7-5: Ausschließliche Nutzung der Abluft am Ofen Striko 3

		Aktuell	60 % Nutzung
Vorhandene Abgaswärme	kWh/Jahr	1 860 000	1 110 000
Äquivalenter Erdgasverbrauch	m ³ /Jahr	186 000	110 000
Äquivalente CO₂-Emissionen	t CO ₂ /Jahr	316	190

Durch die Abwärmenutzung ist eine Erdgasreduzierung von 110 000 m³/Jahr zu erzielen. Der Betrag der Kohlendioxidemissions-Reduzierung läge bei 291 t CO₂/Jahr (Optimierung) bzw. bei 481 t CO₂/Jahr (Optimierung + Abwärmenutzung). Während die Aufwendungen zur ausschließlichen Optimierung des Schachtschmelzofens Striko 3 moderat ausfallen, müssen Investitionen zur Abwärmenutzung im Bereich von 100 000 bis 200 000 € angesetzt werden.

7.5 Praxisbeispiel 3: Abwärmenutzung bei Elektroschmelzöfen

Erheblich schwieriger gestaltet sich die Abwärmenutzung an elektrisch beheizten Induktionsschmelzöfen. Wie oben dargestellt, gehen bei diesen Öfen etwa 30 % bis 40 % der zugeführten elektrischen Energie durch Wärmeverluste verloren. Ein Teil dieser Verlustenergie findet sich im Kühlwasserkreislauf bzw. dem Abluftstrom wieder. Eine indirekte Möglichkeit zur Reduktion des gesamten Energieverbrauchs eines Elektroschmelzbetriebes bestünde daher in der Nutzung obiger Abwärmen. Wirtschaftlich sinnvoll lassen sich Abwärmenutzungsanlagen jedoch nur dann betreiben, wenn der Wärmeanfall kontinuierlich ist, ein hohes Temperaturniveau für eine direkte Nutzung vorliegt und die Wärmeentnahme den Produktionsprozess nicht behindert.

Bei Induktionsschmelzöfen sind diese Voraussetzungen nur sehr bedingt erfüllt. Das Temperaturniveau von maximal 65 bis 70 °C (im untersuchten Betrieb ca. 55 °C) bei der Spulenkühlung schränkt die Nutzungsmöglichkeiten günstigstenfalls auf Niedertemperaturheizwecke und Brauchwassererwärmung ein! In den wenigen ausgeführten Anlagen muss mit Zusatzbrennern das Temperaturniveau aufwändig angehoben werden.

Noch problematischer ist die Nutzung der Wärme in der Abluft, die die Stäube und Abgase der Schmelzöfen abführt. Hier findet man in der Regel große Volumenströme mit sehr niedrigen Temperaturen von 40 °C – 50 °C vor. Damit sind einer möglichen Nutzung engste Grenzen gesetzt. Einzig denkbar sind Luft-/Luft-Wärmetauscher, um Hallen und Fertigungsstätten zu beheizen oder die Verbrennungsluft in Feuerungsanlagen vorzuheizen. Dabei ist die Rückführung von Schadstoffen

in den Arbeitsbereich durch geeignete (Kurzschlussdichte) Wärmetauscher zu vermeiden. Abgesehen davon, dass selten Verbraucher in unmittelbarer Nähe gefunden werden, ist die Wirtschaftlichkeit solcher Maßnahmen unter gegenwärtigen Rahmenbedingungen nur schwierig nachzuweisen.

7.5.1 Ablufttemperaturen bei spänebeschickten Schmelzöfen

Wie in Kapitel 5.3 dargestellt, können beim Einschmelzen von Spänen durch die Verbrennung der anhaftenden Ölemulsionen größere Energiemengen bei hohen Temperaturen freiwerden. Im Zuge eines Pilotvorhabens wurden daher im untersuchten Schmelzbetrieb vor einigen Jahren an drei Schmelzöfen Wärmetauscher zur Nutzung dieses Potenzials installiert (Abbildung 7-11). Die ursprünglichen Erwartungen an die rückgewinnbaren Energiemengen konnten in der betrieblichen Praxis nicht erfüllt werden.

Daher wurden im Rahmen dieses Vorhabens an ausgewählten Schmelzöfen die Temperaturen des Abgases während des Schmelzprozesses überprüft. In der Abbildung 7-12 ist ein solcher Verlauf für einen Induktions-Tiegelofen mit Schüttelrinne gezeigt:

Der Temperaturverlauf verdeutlicht die Schwierigkeiten einer Nutzung der Abwärme hinter Elektroschmelzöfen mit Spänebeschickung:

- Die hohen Temperaturspitzen über 800 °C sind nur von sehr kurzer Dauer
- Die großen Temperaturgradienten (400 – 500 K/min) belasten den Werkstoff
- Die Temperaturschwankungen verhindern den Aufbau stationärer Wärmeströme von der Primärseite (Abgas) zur Sekundärseite (Heizwasser).

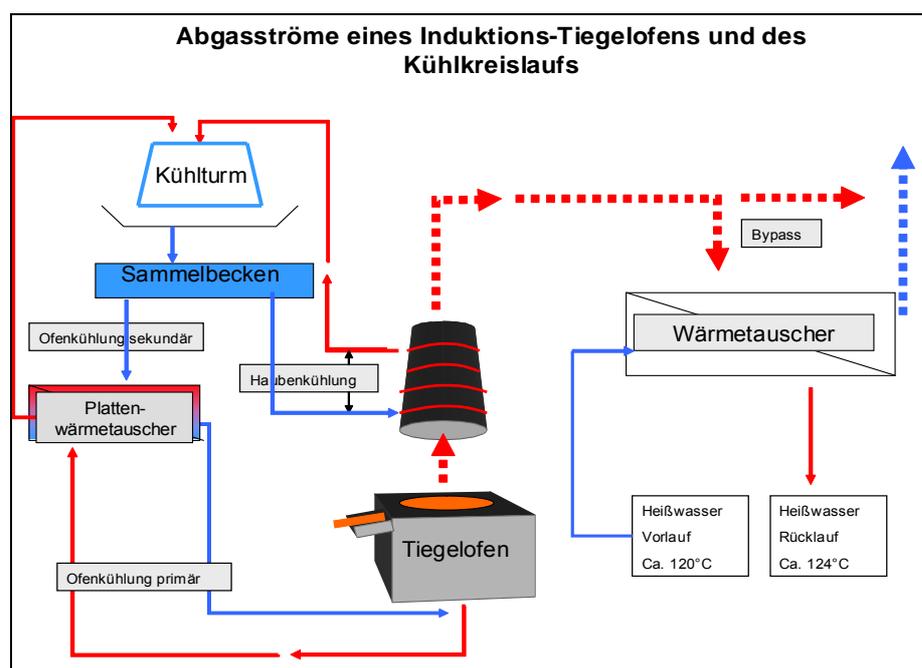


Abbildung 7-11: Abgasströme eines Induktions-Tiegelofens und Kühlkreislaufs

Weitere Untersuchungen der Abgastemperaturen an Schmelzöfen, die gleichmäßiger mit einem Förderband beschickt wurden, ergaben eine gleichmäßigere Temperaturverteilung, aber mit wesentlich niedrigeren Temperaturen (ca. 150 – 200 °C). Deren Nutzung ist im untersuchten Betrieb dadurch stark eingeschränkt, dass der Vorlauf des zu erwärmenden Heißwassers bei ca. 120 °C liegt.

Überprüfungen an den installierten Wärmetauschern im Betrieb A zeigten folgerichtig, dass nur ein Bruchteil der ursprünglich geplanten Wärmeleistung übertragen wird. Gegenüber der optimistischen Auslegung von 1 250 kW werden maximal 40 kW tatsächlich an das Heiznetz übertragen.

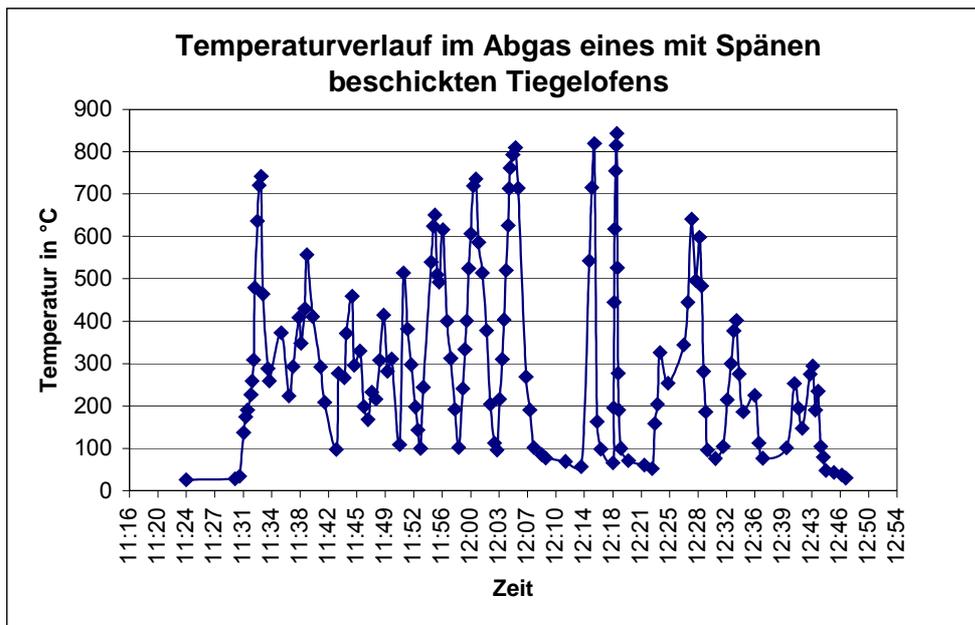


Abbildung 7-12: Temperaturverlauf im Abgas eines mit Spänen beschickten Tiegelofens

7.5.2 Schlussfolgerung

Das hohe Abwärmepotenzial bei *spänebeschickten* Elektroschmelzöfen kann aus physikalischen Gründen nur zu einem geringen Bruchteil energetisch genutzt werden.

Hilfs- und Nebeneinrichtungen (wie z.B. Pumpen, Ventilatoren, Frostschutzeinrichtungen) und zusätzliche Energieverluste in Rohrleitungen etc. zehren einen Teil des Energiegewinns wieder auf. Der energetische Gesamtnutzen ist niedrig einzuschätzen.

Eine optimierte Strömungsauslegung der Absaughaube und Einhausungen der Öfen, soweit sie den Schmelzprozess nicht stören, könnten die Falschlufzufuhr aus der Halle reduzieren, zu höheren mittleren Abgastemperaturen und einer etwas höheren Energieausbeute führen.

7.6 Sonderthema: Nutzung des Energieinhalts im Gussteil (Bolzen)

Bei energetischen Analysen in Gießereibetrieben taucht regelmäßig die Frage nach dem Potenzial und der möglichen Nutzung jener Wärmeenergie auf, die in den heißen Gussteilen vorhanden ist. Es zeigt sich, dass für eine solche Energierückgewinnung keine standardisierten technischen Lösungen vorliegen. Die Gründe dafür sind:

- diskontinuierlicher Anfall der Gussteile (hier untersucht: Gussbolzen).
- „Bindung“ der Wärmeenergie an einen Festkörper. Diese muss zur weiteren Nutzung in direkter Berührung erst an einen fluiden Wärmeträger (Luft, Wasser) übertragen werden
- hoher technologischer Aufwand solcher Verfahren mit vielen Nebenproblemen (z.B. Verschmutzung des Wärmeträgers, aufwändige Gussteilelogistik)
- erreichbare Temperaturen des Übertragungsmediums liegen beträchtlich unter denen der Gussteile
- bei Wasser als Trägermedium sind maximal 100 °C erreichbar (offene Behälter).
- mögliche Störungen des gesamten Prozessablaufes

Daher bleiben nur 3 Ansätze für die Nutzung dieser an heiße Festkörper gebundenen Energie:

- Vorwärmung des Schmelzgutes (z.B. Schrott)
- Weiterverarbeitung vor dem Auskühlung, um den Energieaufwand für das Wiederaufwärmen zu verringern

- Errichtung von Auskühlkammern im Gegenstromverfahren, deren Abluft direkt zur Heizung von (Fertigungs-)hallen genutzt wird

Die erste Möglichkeit wird in Eisengießereien immer wieder diskutiert, erfordert allerdings aufwändige Apparate und eine ausgeklügelte Logistik.

Die physikalischen Voraussetzungen für den zweiten Weg wurden im Betrieb A untersucht:

7.6.1 Auskühlverhalten heißer Gussteile (z.B. Gussbolzen)

Die heißen Gussbolzen werden nach dem Sägen mittels Flurförderzeugen zum Auskühlen im Freien gestapelt. Etwa 5 Stapelplätze sind über das Werk verteilt.

Bei bisherigen werksinternen Überlegungen zur gespeicherten Bolzenwärme ging man von der Annahme aus, die Bolzen besäßen ab Säge bzw. Transportrampe noch ein nutzbares Temperaturniveau von 600 °C. Theoretisch entspräche das etwa einer Energie von 65 kWh/t Gussbolzen (Bezug: Umgebungstemperatur).

Die Abbildung 6-9 zeigt den gemessenen Temperaturverlauf ab Austritt Kokille über einen Zeitraum von etwa 26 Stunden. Schon durch die Wasserkühlung am Ende des Gießvorganges nimmt die Temperatur auf Werte unterhalb 400 °C ab. Die Temperatur nach dem Transport zum Lagerplatz liegt nur noch knapp über 300 °C.

Damit ist die jetzt noch gespeicherte und nutzbare Energie (zumindest theoretisch) gegenüber bisherigen Vorstellungen auf etwa 31 kWh/t mehr als halbiert.

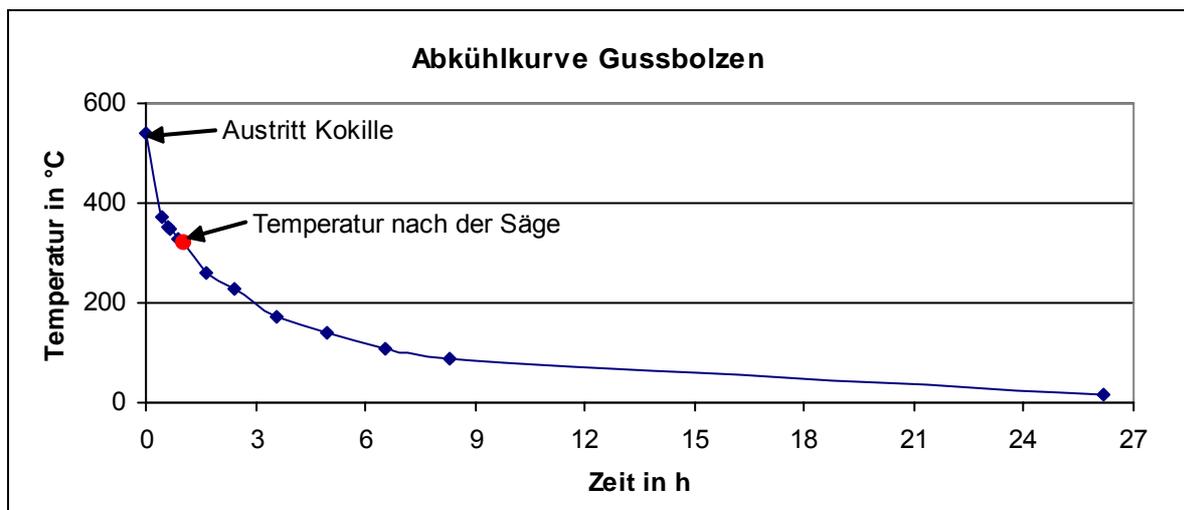


Abbildung 7-13: Abkühlung Messing-Gussbolzen nach dem Austritt aus der Kokille

Der Temperaturverlauf am Stapelplatz selbst ist für 4 Bolzen eines Stapels in nachfolgender Abbildung etwas detaillierter dargestellt. Sie zeigen unabhängig von der Position im Stapel ein nahezu gleiches Verhalten: Die Temperatur klingt rasch ab, nach 5 Stunden sind 100 °C unterschritten, nach 24 h nahezu Umgebungstemperatur (4 – 5 °C an den Messtagen) erreicht.

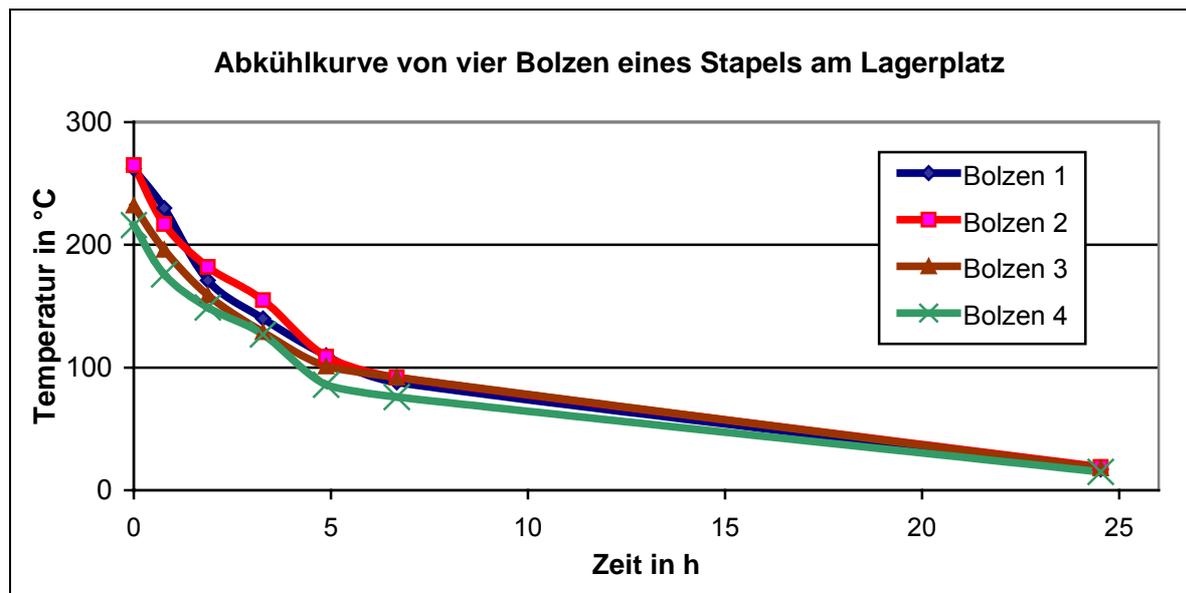


Abbildung 7-14: Abkühlung Messing-Gussbolzen am Lagerplatz

Um durch zügige Weiterverarbeitung eine merkliche Energieeinsparung bei der Wiederaufwärmung zu erreichen, sollte die mittlere Verweilzeit am Lagerplatz 1 Stunde (entsprechend 200 °C) nicht überschreiten. Dann wären insgesamt seit Gussbeginn gerade 3 Stunden verstrichen. Eine wärmeisolierte Einhausung des Stapelplatzes – wie zuweilen vorgeschlagen – könnte das Abklingen etwas verlangsamen und die Pufferzeit verlängern. Damit ließen sich, vordergründig betrachtet, etwa 30 % des heute benötigten Energieaufwandes beim Wiederanwärmen der Bolzen einsparen.

Tatsächlich ist der Einspareffekt bei modernen Wiederaufwärmeöfen (z.B. Typ C.O.I.M., siehe Kapitel 6.5) wesentlich niedriger, da ja die Wärme der Ofenabgase (unterhalb 250 °C – 300 °C) nicht mehr zur Bolzenvorwärmung genutzt wird, und daher dessen Wirkungsgrad deutlich (um etwa 25 %) schlechter wird.

Damit wird das Problem der schlechten Energieausnutzung lediglich auf den Ofen zurückverlagert.

Eine überschlägige Energiebetrachtung liefert folgendes Ergebnis

Tabelle 7-6: Überschlägige Betrachtung für die Nutzung der Bolzenrestenergie

Restenergie Gussbolzen (200°C)	20 kWh/t
reduzierter Wirkungsgrad Erwärmungs-ofen (C.O.I.M)	ca. 50 %
Energieverbrauch (200 °C auf 600 °C bei eta = 50 %)	104 kWh/t
bisheriger Energieverbrauch (20 °C auf 600 °C)	116 kWh/t
Energieminderverbrauch	12 kWh/t
Kostenreinsparung bei 100 000 t/a mit 30 €/MWh	36 000 €/a
Investitionen (geschätzt) Warmhalte-kammer, Fördereinrichtungen, Leitechnik, evtl. Personal etc.)	> 0.5 Mio. €

Notwendig wäre neben einer aufwändigen, geschlossenen Warmhalte-kammer eine enge Verzahnung zwischen Gießprozess und Weiterverarbeitung. Solche starren Abhängigkeiten zwischen zwei nicht immer störungsfreien Prozessen sind betriebstechnisch kritisch einzuschätzen.

Ergänzend sei erwähnt, dass der dritte oben genannte Lösungsweg zur Nutzung der Wärmeenergie heißer Gussteile – die direkte Nutzung der Abwärme – ebenfalls einer vergleichbaren Investition für die Einhausung mit entsprechenden Fördereinrichtungen und automatischen Öffnungs- und Schließ-toren bedarf.

Im untersuchten Werk lägen die nächsten Abnehmer von Warmluft für Hallenerwärmung einige 100 m (bis zu 800 m) entfernt.

8 Checkliste effiziente Energieverwendung in NE-Metall-Schmelzbetriebe

Neben konkreten Praxisbeispielen (siehe Kapitel 6 und 7) können aus den Erfahrungen in den Betrieben folgende Hinweise und Handlungsempfehlungen abgeleitet werden.

Auf Grund der deutlichen Unterschiede werden brennstoffbeheizte und elektrisch induktiv beheizte Schmelzanlagen getrennt behandelt.

8.1 Hinweise für Gießereien mit brennstoffbeheizten Schmelzöfen

8.1.1 Ofentyp

Schachtschmelzöfen

Bedingt durch die Vorwärmung des Schmelzgutes im Schacht und durch den Einsatz moderner Regenerationsbrenner besitzen heute Schachtschmelzöfen relativ gute energetische Kennwerte. Der spez. Schmelzenergieaufwand beträgt ca. 700 – 800 kWh_{th}/t. Erforderlich ist eine Optimierung der Füllstands- und Brennerregelung.

Tiegelöfen

Für kleinere Schmelzleistungen und Warmhaltekapazitäten sind Tiegelöfen zu empfehlen. Neuwertige Tiegel, Rekuperationsbrenner, wärmegeämmte und abgedichtete Ausmauerung und automatisierte Abdeckung ergeben auch für Tiegelöfen gute energetische Kennwerte von 800 – 900 kWh_{th}/t.

8.1.2 Ofenregelung

Die Temperaturregelung des Ofens sollte so ausgelegt ein, dass

- keine unnötige Überhitzung des Schmelzmaterials auftritt,
- sich eine einheitliche Schmelzbadtemperatur einstellt
- die Brennerleistungen an die Betriebszustände (Warmhalten, Aufschmelzen) angepasst werden

Anmerkung: Bei gut wärmegeämmten Öfen sind höhere Anforderungen an die Regelung und die Feuerungstechnik zu stellen.

8.1.3 Ofendimensionierung

- Die Öfen sollten an die zu erwartende Schmelz- und Warmhalteleistung angepasst sein. Bei einer zu geringen Auslastung, die mit ca. 20 % angegeben werden kann (vergl. hierzu Abbildung 6-1), tritt ein zu hoher spezifischer Schmelzenergieaufwand auf.

8.1.4 Brennerauswahl

- Rekuperationsbrenner sind für kleinere und mittlere Leistungen wirtschaftlich
- Regenerationsbrenner und Drehbettregeneratoren stellen für stark ausgelastete Schmelzöfen eine wirtschaftliche Lösung dar
- Rekuperationsbrenner und Regenerationsbrenner verändern das Flammenbild und die Ofendurchströmung. Eine Anpassung von Brenner und Ofen ist erforderlich. Ansonsten sinkt die Aufschmelzleistung und die erwartete Energieeinsparung tritt nicht ein.

8.1.5 Schmelzgutmanagement

- hohe Auslastung der Öfen anstreben
- Warmhaltezeiten vermeiden
- keine langen Vorheizzeiten zu Schicht- oder Wochenbeginn
- Reduzierung der Teillastzeiten

8.1.6 Warmhaltebetrieb optimieren

- Ofenabdeckung immer einsetzen
- Ofen abdichten, Verschließen der Ofentür, Schaulöcher, Gießschnauze
- Reduzierung der Warmhaltebadtemperatur am Wochenende

8.1.7 Schmelzbetrieb optimieren

- Chargieverluste durch kurze Füll- und Ladezeiten verkürzen
- Schmelzgut vorwärmen
- Pflege der Ofentür und der Ofenzustellung
- Feuerfestmaterialauswahl mit ausgewogener Gewichtung hinsichtlich der Isolationsfähigkeit (Vermeidung von Wärmeverlusten), Temperaturwechselbeständigkeit, Verschleißfestigkeit und Widerstandsfähigkeit gegenüber Korundbildung (Bildung von Aluminiumoxid: $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)
- Verkürzung der Reinigungszeiten
- Vermeidung ungenauer Brennereinstellungen
Luftüberschuss gering halten, Flammenform und Ofeninnendruck anpassen
- Materialvorwärmung in separaten (externen) Kammern
- Verminderung des Krätzeanfalls (Schlacke mit Aluminiumeinschlüssen)

8.1.8 Sonstiges

- Optimierung der Absaugung
- Materialvorwärmung in separaten (externen) Kammern
- Prüfung des Einsatzes von Spülsteinen und elektromagnetischen Rührern

8.1.9 Abwärmenutzung prüfen

- Ausreichendes Temperaturniveau und Temperaturkonstanz
- Wärmeverbraucher zur Wärmeabnahme vorhanden
- Geringe Entfernung zwischen Schmelzöfen und Wärmenutzung

8.1.10 Flüssigmetallanlieferung

- Energieeinsparung hängt von der energetischen Güte des ursprünglichen Schmelzprozesses in der Gießerei ab
- Keine Energieeinsparung (Hütte, Transport, Gießerei), wenn der Schmelzprozess in der Gießerei schlechter als $600 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{t}$
- Je 100 km Transport ca. 75 kWh Mehrenergieaufwand
- Güte des Transportbehälters
- Gute Dämmeigenschaften Auskühlung (5 – 10 K/h)
- Mittlere Dämmeigenschaften (10 – 15 K/h)
- Schlechte Dämmeigenschaften (15 – 20 K/h)
- Vorwärmung der Transportbehälter mit Rekuperator-Brenner

8.1.11 Prozessdatenerfassung und Kennzahlen

- Ausstattung der Schmelzöfen mit Wiegezellen und kontinuierlicher Prozessdatenerfassung
- Bildung von Kennzahlen, z.B. spez. Schmelzenergieverbrauch (kWh/t)

Branchenspezifische Kennzahlen:

Energiekennzahlen werden zur Beurteilung von Trends, Effizienz und Vergleichen sowie als Kommunikationsgrundlage herangezogen. Als Ausgangsgröße zur Bildung der Kennzahlen dient überwiegend die eingesetzte Energiemenge mit Bezug auf das produzierte Gewicht. Dabei werden die Energiemengen nach Energieträgern (z.B. Öl, Erdgas, Strom) unterschieden. Beispielsweise können Kennzahlen wie die spezifischen Energieverbrauchswerte in $\text{kWh}_{\text{th}}/\text{t}$ Erdgas/t, $\text{kWh}_{\text{el}}/\text{t}$ Strom/t oder $\text{kWh}_{\text{th}}/\text{t}$ Abwärme/t einen anschaulichen Prozessvergleich ermöglichen.

Anlagenspezifische Kennzahlen:

Neben diesen branchenspezifischen Kennzahlen bieten sich ergänzend anlagenspezifische Kennzahlen an, die Informationen über die Auslastung oder den Volllast- bzw. Teillastbetrieb liefern. Darüber hinaus ist der Wirkungsgrad ermittelt aus dem Verhältnis von notwendiger zu verbrauchter Energie ein wichtiger Faktor für die Qualitätsbeurteilung des Prozesses. Die Kennzahlen helfen dabei, nach Ablauf der Planungsperiode einen Vergleich der tatsächlichen Werte mit den Planwerten vorzunehmen und gegebenenfalls gewinnbringende Verbesserungen abzuleiten.

8.2 Allg. Handlungsempfehlungen für Gießereien mit Induktionsschmelzaggregaten

8.2.1.1 Ofentyp

Der Induktions-Rinnenofen zeigt den niedrigsten spezifischen Energieverbrauch. Immer dann, wenn stückiges Schmelzgut im Dauerbetrieb eingeschmolzen werden soll, eignet sich dieser Ofentyp. Der Induktions-Tiegelofen besitzt einen ca. 20 – 25 % höheren Energieverbrauch, ist jedoch von seiner Einsatzflexibilität dem Rinnenofen überlegen. Insbesondere bei diskontinuierlichem Betrieb, bei häufigem Legierungswechsel und beim Einschmelzen von Spänen ist diesem Ofentyp der Vorzug zu geben.

Die Schmelz- bzw. Überhitzungs- und Warmhalteprozesse sollten im jeweils geeigneten Ofentypus getrennt durchgeführt werden. So kann das Aufschmelzen von Spänen nur im Induktions-Tiegelofen zufrieden stellend, aber bei relativ hohem spezifischem Energieaufwand betrieben werden. Für die Überhitzung und das Warmhalten des Schmelzgutes eignet sich der Induktions-Rinnenofen mit seinem niedrigeren Energieverbrauch besser.

Speziell für das Schmelzen von Spänen (z.B. Messingspänen) befinden sich kombinierte Tiegel- und Rinnenöfen in der Entwicklung, deren Energieverbrauch deutlich unter dem des Tiegelofens liegen.

8.2.2 Ofendimensionierung

Das Fassungsvermögen und die spezifische Schmelzleistung von Induktionsöfen müssen für die tatsächliche Gießleistung ausgelegt sein. Zu groß dimensionierte Öfen tendieren zu einem niedrigeren Wirkungsgrad, also zu einem höheren spezifischen Stromverbrauch.

8.2.3 Netzfrequenz/Mittelfrequenz

- Umrichter gespeiste Induktions-Tiegelöfen besitzen gegenüber Netzfrequenzöfen bessere Wirkungsgrade und höhere Einsatzflexibilität.
- Durch Steuerung der Badströmung mittels variabler Frequenz lassen sich Abbrandverluste und damit Energieverluste minimieren.

8.2.4 Prozesssteuerung und Automatisierung

Mit moderner Prozesstechnik lassen sich nicht nur die Schmelzvorgänge automatisieren, sondern auch energieeffizient steuern und überwachen. Manuelle Eingriffsmöglichkeiten auf die Prozessführung sollten auch auf ihre Energierelevanz überprüft werden.

8.2.5 Produktionsabläufe

- Generell ist eine hohe Auslastung jedes Schmelzaggregates anzustreben. Stillstände, Leerlauf und Wartezeiten (z.B. bei Analysen) verursachen ständige Wärmeverluste.
- Produktionsabläufe bei Schmelzaggregaten, die aus mehreren Schmelzöfen, aber nur einem Vergießofen bestehen, sind so zu verzahnen, dass gegenseitiges Warten vermieden wird (Automatisierung).

8.2.6 Nebenzeiten

- Möglichst kurze Schmelzzeiten anstreben (evtl. Leistungsregelung automatisieren).
- Haltezeiten für chemische Analysen und Nachlegieren so kurz wie möglich einrichten.
- Lange Wartezeiten vor dem Abgießen vermeiden.

8.2.7 Dichte des Schmelzgutes

- Schmelzgut hoher Raumdichte (kg Schmelzgut/m³ Schüttvolumen) benötigt einen niedrigeren Stromverbrauch als solches mit niedrigerer Raumdichte.
- Bei unterschiedlicher Raumdichtestruktur des Schmelzgutes (Späne bis Grobschrott) kann durch geeignete Mischung der Einsatzstoffe die Einschmelzzeit und der Energieverbrauch reduziert werden.

8.2.8 Entfernen von Schlackenansätzen

Schlackenansätze reduzieren u.a. die induktive Kopplung zwischen Leistungsspule und Schmelzgut und verringern die Schmelzleistung. Dies kann nur durch eine Verlängerung der Schmelzzeit oder eine Erhöhung der zugeführten Leistung ausgeglichen werden kann. Beides führt zu höherem spezifischem Energieeinsatz.

8.2.9 Chargierpraxis

- Netzfrequenz-Tiegelöfen verbrauchen am wenigsten Energie, wenn sie mit mindestens 50 bis 60 % Sumpf gefahren werden, d.h. wenn quasikontinuierlich eingeschmolzen wird.
- Mittelfrequenz-Tiegelöfen zeigen im Chargenbetrieb mit vollständiger Entleerung den geringsten spezifischen Energieverbrauch. Bei kleinstückigem Schmelzmaterial ist der leere Ofen nach jedem Abguss bis oberhalb der Spulenhöhe aufzufüllen und entsprechend dem Schmelzfortschritt nachzuchargieren.
- Keine Beschickung des Ofens unter voller Leistung.

8.2.10 Ofenbetrieb

- Unnötige Überhitzung der Schmelze sollte vermieden werden (evtl. Automatisierung)
- Energieverbrauch beim Warmhaltebetrieb bei (Wochenend-)stillständen überprüfen (evtl. Automatisierung)

8.2.11 Abluft

- Abluftmenge aus Induktionsöfen nach Bedarf regeln. Nicht immer Volllast fahren.
- Drehzahlgeregelte Antriebe nachrüsten.
- Absperrmöglichkeiten für momentan unbenutzte Leitungen vorsehen.
- Gebläsesteuerung über Drucksensoren.

9 Hinweise auf energetische Optimierungsmöglichkeiten bei Querschnittstechnologien

Ziel dieses Projektes ist die Fokussierung auf die wesentlichen, energetisch hauptsächlich relevanten Prozesse und Verbraucher in der NE-Metallbranche.

Zusätzlich wird auf Publikationen verwiesen, die die energetische Optimierung von Querschnittstechnologien behandelt:

9.1 Druckluft

- Fraunhofer ISI. Kampagne Druckluft effizient. <http://www.druckluft-effizient.de> vom 07/2004.
- Energieagentur NRW. <http://www.ea-nrw.de/druckluftrechner>
- Effiziente Druckluftsysteme Energie sparen – Klima schützen – Kosten senken. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz. Augsburg. 2004.
- Bahr, M.; Ruppelt, E.; Taschenbuch Drucklufttechnik. Vulkan Verlag. 2004.

9.2 Entstaubung

- Vermeidung der Staubbildung in Hochofengießhallen. Abschlussbericht. Bundesumweltamt. 04/1997.
- Schneider, T; Sabo, F; Handte, J; Geppert, B.; Neues Hochtechnologie Biofilter im Gießereiwesen. Reinluft Umwelttech Ingenieurgesellschaft, Tuttlingen
- Reimann, D.O.; von Turegg, R.: Bedeutung und Techniken der Entstaubung von Rauchgasen, Entsorgungspraxis 4/90. 1990.
- Marx, K.; Visser, W.; .Energie- und verfahrenstechnische Verbesserung von Absaugesystemen zur Brenngasgewinnung und Entstaubung an Konvertern – Betriebsforschungsinstitut, Düsseldorf. 1990.
- Caspers, K.-H.; Aspekte und Ausführungsbeispiele zur Vermeidung von Staubemissionen in Gießereien. Gießerei Nr. 78. 1991.
- Lindas, S.; Reinhaltung der Luft in der Gießerei. Hommes et Fonderie Nr.: 246. 1994.
- Reinhardt, A.; Sterngefaltete Filterelemente für kompakte Entstaubungstechnik. Herstellerinformation. Mahle Filtersysteme, Öhringen.
- Jirkowsky, C.; Rauchgasreinigung - Kondensation - Wärmerückgewinnung – Entstaubung – Dunstentfernung; Stand der Technik in der Rauchgasreinigung; Euroheat & Power * Band 32. English Edition. 2003.

9.3 Hydraulik

- Grollius, H.-W.; Grundlagen der Hydraulik. Vulkan Verlag. 2002.

9.4 Beleuchtung

- Effiziente Lichtsysteme: Energie sparen – Klima schützen – Kosten senken. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz. Augsburg. 2004.
- Gutes Licht für Handwerk und Industrie. Fördergemeinschaft Gutes Licht (FGL), Frankfurt am Main (Hrsg.) 2000.
- Gröger, A.; Energiemanagement mit Gebäudeautomationssystemen. Renningen. Expert-Verlag, 2004.

9.5 Maschinen, Motoren

- Klima schützen – Kosten senken. Leitfaden für effiziente Energienutzung in Industrie und Gewerbe. Landesamt für Umweltschutz. Augsburg. 2004.
- Motorchallenge Deutschland. Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung. Abteilung Energietechnik und Energiepolitik. www.motorchallenge.de. 07/2004.

9.6 Pumpen

- Info-Paket bei Umwälzpumpen. Impuls-Programm Hessen. 01/2000

9.7 Lüftung, Klima

- Energieeffiziente Lüftungsanlagen in Betrieben. Landesgewerbeamt Baden-Württemberg, Stuttgart. Informationszentrum Energie. 2002.

9.8 Kühlung

- Absorptionskälte – Funktionsprinzip und Einsatzfelder und Wirtschaftlichkeitsberechnung. ASUE. 7/2000.

9.9 Energiemanagement

- Info-Paket Gebäudeautomations- und Bussysteme, Impuls-Programm Hessen, 01/2000.
- Energiemanagement in verteilten Liegenschaften. BINE. Profiinfo II/1996.
- Info-Paket zum Lastmanagement. Impuls-Programm Hessen, 5/2000.
- Lehrgangsinformation Lastmanagement. Energiemanager IHK. Nürnberg. 1/2000.
- Dehli, M.; Energieeffizienz. Praktische Möglichkeiten des rationellen Energieeinsatzes in Industrie und Gewerbe. Frankfurt a.M.: VWEW Energieverlag. 1999.
- Stromsparen im Betrieb. Landesgewerbeamt Baden-Württemberg, Stuttgart. Informationszentrum Energie. 2001.
- Wanke, A.; Trenz, S.; Energiemanagement für mittelständische Unternehmen. Rationeller Energieeinsatz in der Praxis. Arbeitsschritte – Planungshilfen – Lösungsbeispiele. Köln : Verl. Deutscher Wirtschaftsdienst, 2001.
- Betriebliches Energiemanagement – Energiecontrolling – Energiekennwerte – Kostenaspekte – Verknüpfung mit anderen Managementaufgaben – Erfahrungsberichte und neue Ansätze. Verein Deutscher Ingenieure (VDI), Düsseldorf. Düsseldorf. VDI- 2003.

10 Übersicht Einsparmaßnahmen

In den Betrieben zeigen sich erhebliche Einsparpotenziale, die nachfolgend dargestellt werden.

10.1 Zusammenfassung der Einsparpotenziale in Schmelzbetrieben mit brennstoffbeheizten Öfen

10.1.1 Tiegelöfen (Betrieb C)

An den Tiegelöfen gliedern sich die Optimierungsmöglichkeiten wie folgt:

- Verbesserung der Auslastung
- Abdeckung der Tiegel
- Neue Ofenausmauerung
- Neuer Tiegelofen mit Rekuperationsbrenner
- Neuer Tiegelofen mit Regenerator

Tabelle 10-1: Einsparmöglichkeiten an Tiegelöfen

		Standtiegel SLV 200 Ist Zustand	Standtiegel SLV 200 Auslastung verdoppelt	Standtiegel SLV 200 mit Deckel, manuell betätigt	Standtiegel SLV 200 mit Deckel, automatisch betätigt
Jahresgasverbrauch	MWh/a	506	326	384	384
Einsparung	MWh/a		180	122	122
Einsparung	%		36	24	24
Energiekosten	€/a	17.700	11.400	13.450	13.450
Einsparung	€/a		6.300	4.250	4.250
Investkosten	€	-	-	800	8.200
Amortisationszeit	a	-	-	0,2	1,9
Einsparung CO₂	t/a		36	24	24

Tabelle 10-2: Einsparmöglichkeiten an Tiegelöfen

		Standtiegel SLV 500	Standtiegel SLV 500	Standtiegel SLV 500	Kipptiegel KLV 600 (Bj.1980)	Kipptiegel KLV 600 (neu)	Kipptiegel KLV 600 (neu)
		Ist Zu- stand	Neue Ofen- ausmaue- rung	2-stufiger Brenner	Ist Zu- stand	Reku- Brenner	Regenera- tiv-Brenner
Jahresgas- verbrauch	MWh/a	1.275	1.115	1.230	1.033	670	530
Einsparung	MWh/a		160	45		363	503
Einsparung	%		13%	4%		35	49
Energiekosten	€/a	44.550	38.980	43.050	36.170	23.490	18.500
Einsparung	€/a		5.570	1.500		12.680	17.670
Investkosten	€	0	11.700	11.000	-	45.700	60.000
Amortisations- zeit	a	0	2,1	7,3	-	3,6	3,4
Einsparung CO₂	t/a		32	8		72	100

Weitere Einsparpotenziale liegen in:

- Vermeidung von Überhitzung (Einsparpotenzial ca. 5 – 10 %)
- Schließen des Notauslaufs (Einsparpotenzial ca. 5 %)
- Kontrolle des Füllstandes (Einsparpotenzial ca. 5 – 10 %)

Die Maßnahmen sind nicht auf die beispielhaft gewählten Schmelzöfen beschränkt. So wird eine höhere Auslastung und eine Abdeckung bei allen Ofentypen eine erhebliche Einsparung bringen.

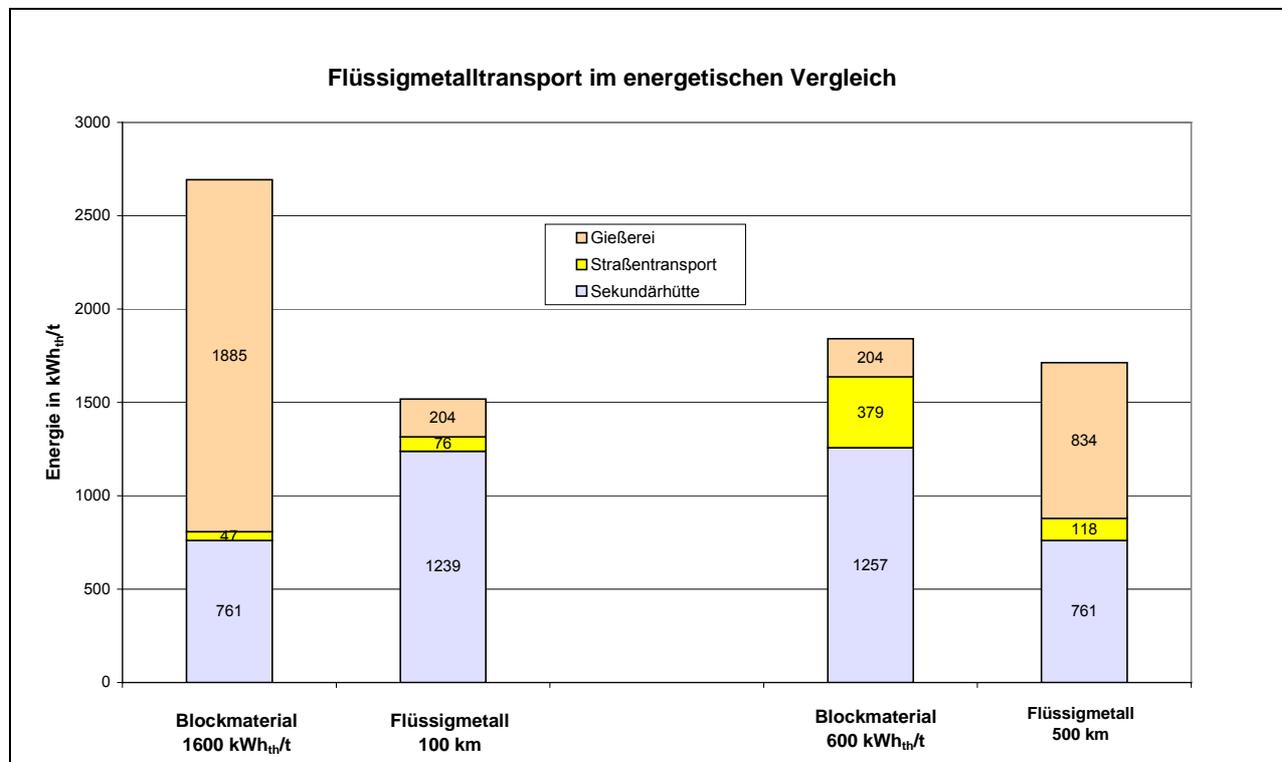


Abbildung 10-1: Einsparpotenzial an Tiegelöfen, Betrieb C

10.1.2 Schachtschmelzöfen (Betrieb D)

Die Studie an den Schachtschmelzöfen ergibt, dass durch eine Prozessoptimierung im Schachtschmelzofen der spezifische Erdgasverbrauch von 870 kWh_{th}/t auf 720 kWh_{th}/t gesenkt werden kann.

Tabelle 10-3: Optimierung des Schachtschmelzofenprozesses (Betrieb D, Striko 3)

	Spezifischer Erdgasverbrauch	Jährl. mittlere Erdgasreduzierung ¹⁾
	m ³ Erdgas/t _{Brutto}	m ³ Erdgas/a
Aktueller Erdgasverbrauch	87	
Erdgasverbrauch nach Optimierungsmaßnahmen	72	
Summe der jährlichen Einsparung		176 700
Weitere Potenziale		
6. Einsatz einer Abgasklappe im Warmhaltebetrieb am Wochenende	- 1	11 400
7. Chargierung (50 % Bl./50 % Kr.) anstelle (60 % Bl./40 % Kr.)	- 1 bis - 2	17 100
8. Kontinuierlicher und voll ausgelasteter Ofenbetrieb	- 4	45 600
Summe der jährlichen Einsparung		74 100

Ergänzend zu den oben aufgeführten Maßnahmen zur Optimierung des Schachtschmelzofenbetriebes wird den Betreibern empfohlen, permanent und konsequent folgende Energieoptimierungsansätze zu verfolgen:

10.1.2.1 Weitere Optimierungsmöglichkeiten mit Investitionsaufwand

Zu den genannten Punkten kann keine belastbare Angabe hinsichtlich der bezifferbaren Einsparungen gemacht werden, da die Literaturwerte sehr unterschiedlich sind.

- Verminderung des Krätzeanfalls (Schlacke mit Aluminiumeinschlüssen)
- Verschließen der Ofentür, Schaulöcher, Gießschnauze
- Reduzierung der Warmhaltebadtemperatur am Wochenende (s. Kapitel 5.6.1)
- Verkürzung der Reinigungszeiten
- Reduzierung der Teillastzeiten
- Vermeidung ungenauer Brennereinstellungen
- Pflege der Ofentür und der Ofenzustellung
- Pfannenaufheizung mit Abdeckung (10 bis 20 % Erdgaseinsparung)

10.1.2.2 Optimierungsmöglichkeiten mit mittlerem bis höherer Investitionsaufwand

- Feuerfestmaterialauswahl mit ausgewogener Gewichtung hinsichtlich der Isolationsfähigkeit (Vermeidung von Wärmeverlusten), Temperaturwechselbeständigkeit, Verschleißfestigkeit und Widerstandsfähigkeit gegenüber Korundbildung (Bildung von Aluminiumoxid: $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)
- Ausstattung der Schmelzöfen mit Wiegezellen und kontinuierlicher Prozessdatenerfassung
- Optimierung der Absaugung
- Materialvorwärmung in separaten (externen) Kammern
- Prüfung des Einsatzes von Spülsteinen und elektromagnetischen Rührern

In der Abbildung 10-2 werden die Einsparpotenziale hinsichtlich des Erdgasverbrauches und der CO₂-Emissionen verdeutlicht.

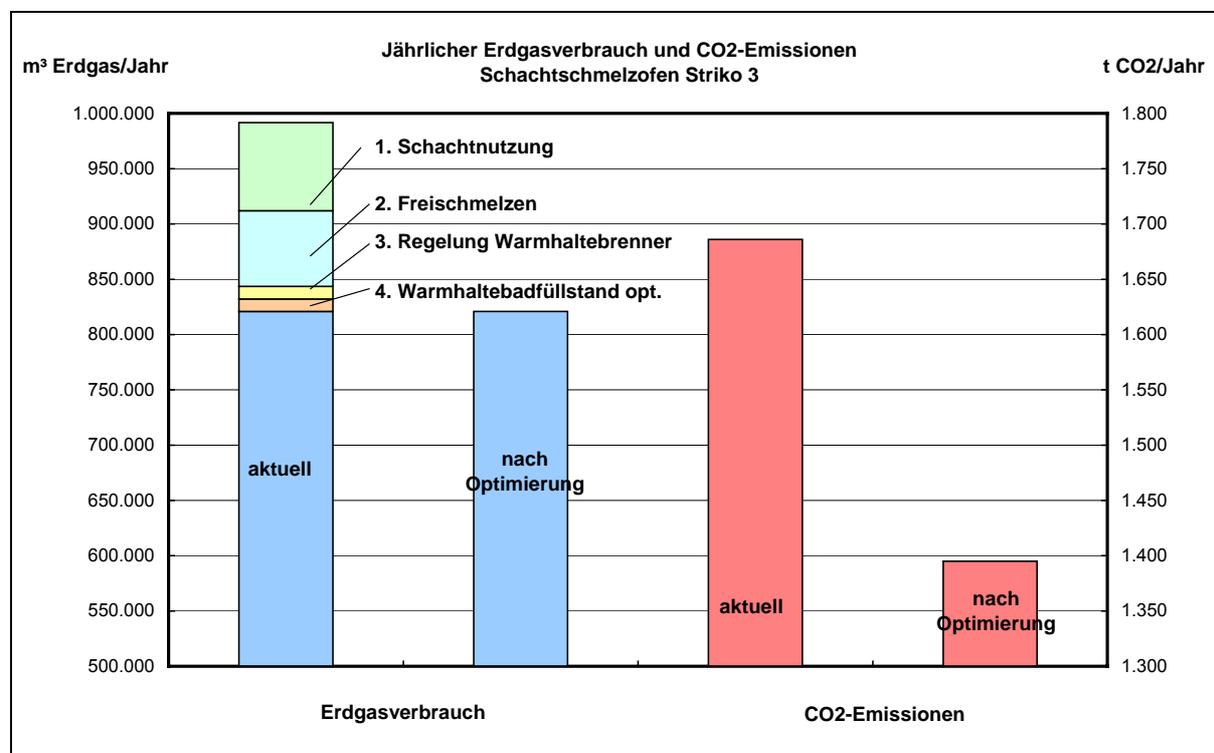


Abbildung 10-2: Vergleich des Erdgasverbrauchs und der CO₂-Emissionen vor und nach einer möglichen Optimierung (ohne Abwärmenutzung)

Tabelle 10-4: Einsparung ausschließlich durch Prozessoptimierung des Schachtschmelzofens Striko 3 (ohne Abwärmenutzung)

Angenommener Gaspreis [€/m ³]	Einsparung pro Jahr [€/Jahr]
0,30	51 300
0,50	85 500

10.2 Flüssigmetallanlieferung

Flüssigmetallanlieferung ist, wie Abbildung 10-3 zeigt, sowohl für den Schmelzbetrieb als auch dann, wenn alle Prozesse in der Hütte betrachtet werden, energetisch günstiger als die Anlieferung von Blockmaterial und Einschmelzen in der Gießerei.

Lediglich wenn in der Gießerei extrem modernste Schmelzanlagen (< 600 kWh_{th}/t) eingesetzt werden und lange Transportwege (> 500 km) vorhanden sind, ist die Anlieferung von Flüssigmetallanlieferung schlechter als die Anlieferung von Blockmaterial.

Energetisch relevante Prozesse bei der Anlieferung von Flüssigmetall sind:

- Das Schmelzen und Warmhalten in der Sekundäraluminiumhütte (ca. 800 kWh/t)
- Das Vorwärmen der Transportbehälter (ca. 150 kWh/t)
- Der Transport mit ca. 75 kWh/100 km Verlust

Die Transportbehälter sollten so gut sein, dass die Auskühlung kleiner 15 K/h beträgt. Mit neuen gut gedämmten Behältern sind Werte von < 10 K/h zu erwarten. Die Oberflächentemperaturen sollten 70 °C nicht übersteigen.

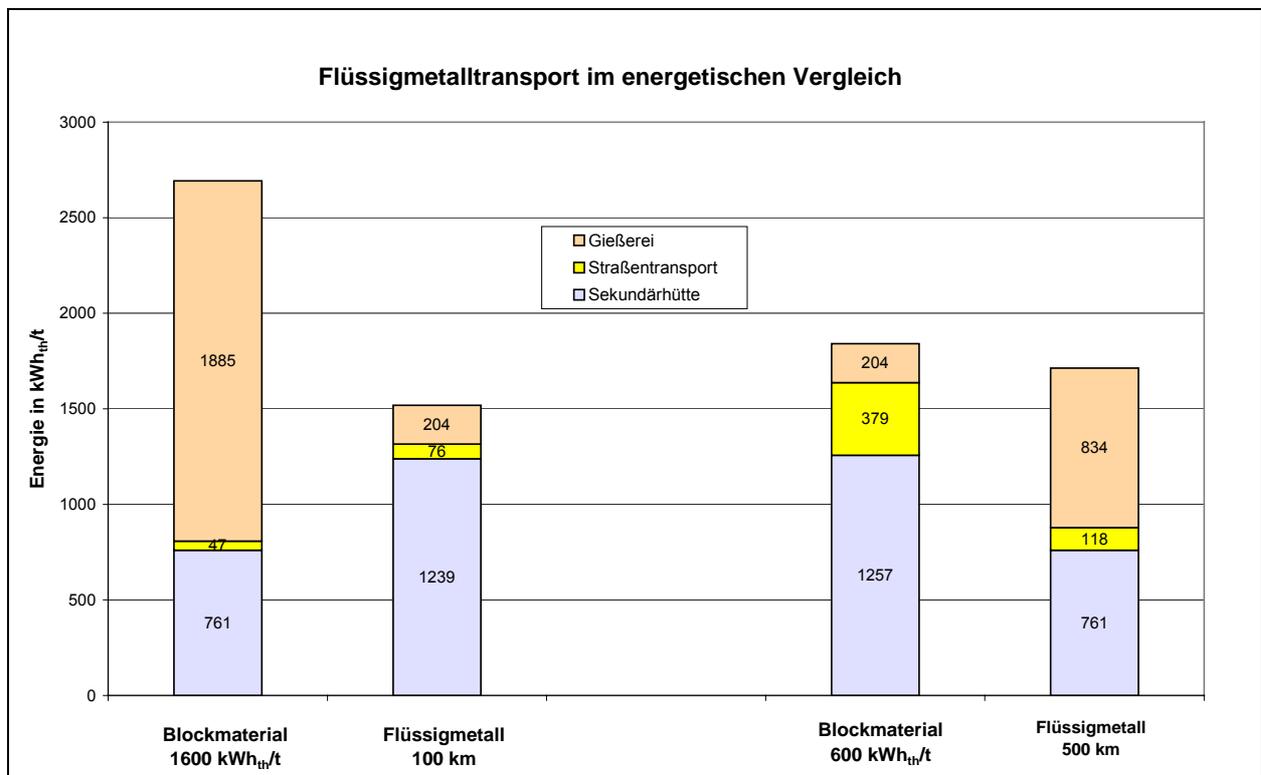


Abbildung 10-3: Vergleich von „Flüssigmetallanlieferung“ und „Anlieferung von Blockmaterial“

10.3 Zusammenfassung der Einsparpotenziale in einem Elektroschmelzbetrieb

10.3.1 Einsparungen im Kernprozess „Schmelzen“

Im Kernprozess des Betriebes, dem Einschmelzen von Messing, ergeben sich folgende Einsparmöglichkeiten (siehe auch Tabelle 10-5).

Tabelle 10-5: Einsparpotenziale für den Kernprozess Schmelzen im Betrieb A

	Einheit	theoretisches Potenzial	technisches Potenzial	wirtschaftliches Potenzial	umsetzbares Potenzial
Schmelzprozess: (investiv) Einsatz von Kombischmelzern	MWh _{el} / a	4 960	2 480	2 480 nur bei Ersatzbedarf	2 480 nur bei Ersatzbedarf
Ersatz gasbeheizte Schmelzrinne MTO (Investiv)	MW _{th} / a	1 350	1 000 Neukonstruktion	1 000	1 000
Wochenendbetrieb der Öfen (nicht investiv)	MWh _{el} / a	55	55	55	55

Hinweise:

- Alle Werte sind als Endenergiewerte angegeben. Bei Umrechnung auf Primärenergien sind die Werte für die elektrische Energie MWh_{el}/a mit dem Faktor 2,6 (Kraftwerksmix) zu multiplizieren.
- Die nachstehenden Zahlen basieren z.T. auf Annahmen bzw. Schätzungen. Sie sind daher als Anhaltswerte zu verstehen und bedürfen im konkreten Einzelfall einer eingehenderen technischen und kaufmännischen Analyse. Insbesondere beruhen die Investitionskosten nicht auf aktuellen Angeboten, sondern auf Standardwerten der letzten Jahre.
- Die verwendeten Potenzialbegriffe folgen den in der Energietechnik gängigen Definitionen. Mit dem theoretischen Potenzial wird das physikalisch maximal erreichbare Potenzial bezeichnet ohne auf die technische Realisierbarkeit (technisches Potenzial) oder die Wirtschaftlichkeit (wirtschaftliches Potenzial) Bezug zu nehmen. Das umsetzbare Potenzial schätzt dann das im Rahmen der strukturellen und organisatorischen Möglichkeiten tatsächlich Machbare ab.

10.3.1.1 Investive Maßnahmen

Schmelzöfen

Da der Energieverbrauch der gegenwärtig eingesetzten Schmelzöfen branchenüblich ist, kann eine nennenswerte Einsparung nur durch Einsatz neuer Schmelztechnologien erfolgen. Als eine Möglichkeit würde sich eine Kombination aus Induktions-Rinnenöfen und Induktions-Tiegelöfen („Kombischmelzer“) anbieten, die sich zurzeit in der Markteinführungsphase befindet. Trotz negativer Erfahrungen des Betriebes A mit einem Prototypen sollte die Weiterentwicklung verfolgt werden, da sich hier große Energieeinsparpotenziale abzeichnen (im Betrieb A ca. 5 000 MWh/a).

Schmelzrinne

An einer Gießanlage wird eine offene Schmelzrinne betrieben. Sie wird ständig mittels Gaslanzen auf Temperatur gehalten. Hier sollte eine eingehauste Neukonstruktion ins Auge gefasst werden. Dies würde allerdings einen schwerwiegenden Eingriff in die bisherige bewährte Schmelzpraxis bedeuten, so dass zur Minimierung von Restrisiken Fachfirmen mit der Konstruktion und dem Umbau betraut werden sollten. Als Zielpreis für die Maßnahme (zur Einhaltung der Wirtschaftlichkeit) wurden 100 000 – 150 000 € berechnet.

10.3.1.2 Nicht investive Maßnahmen

Wochenendbetrieb der Öfen

Durch systematische Aufzeichnung über einen längeren Zeitraum sollte der Energieverbrauch des Warmhaltebetriebs als Funktion der Ofenparameter (Sumpfhöhe, Dämmung, eingestellte Temperatur, Abdeckung etc.) beobachtet und die „Best-Practice“-Vorgehensweise im Betriebsalltag umgesetzt werden.

10.3.2 Einsparungen durch Verbesserung der Wiederaufwärmung

Für die Wiederaufwärmung könnten modernere Ofenanlagen mit deutlich verringertem Energieaufwand zum Einsatz kommen. Da die bisherigen Schnellerwärmungsöfen integraler Bestandteil der komplexen Fertigungsanlagen des Werkes sind, ist wohl eine energetische Optimierung – auch bei gegebener Wirtschaftlichkeit – nur bei einem größeren Werksumbau sinnvoll.

Tabelle 10-6: Einsparung durch Abwärmenutzung und Verbesserung der Wiederaufwärmung

	Einheit	Theoretisches Potenzial	Technisches Potenzial	Wirtschaftliches Potenzial	Umsetzbares Potenzial
(investiv) Austausch veralteter Schnellerwärmungsöfen	MW _{th} /a	5 500	5 500	5 500 Investition nicht genau bekannt	5 500 (nur bei Ersatzbedarf)

10.4 Abwärmenutzung anhand von Praxisbeispielen

Die Abwärmenutzung wird anhand von drei Praxisbeispielen gezeigt.

Praxisbeispiel 1: Abwärmenutzung an Tiegelöfen

An den Tiegelöfen besteht an zwei Gießplätzen ein theoretisches Abwärmepotenzial von je 1 200 MWh/a. Diese Abwärme (Wärmeinhalt der Abgase) ist stark schwankend, da es vom Ofenbetrieb abhängt. Diese steht einem Jahreswärmebedarf für die Gebäudeheizung von ca. 1 500 MWh/a gegenüber.

Über ein Abgaswärmetauschersystem sind bis zu 800 MWh/a für die Heizung zu nutzen. Die Amortisationszeit beträgt ca. 4,6 Jahre.

Praxisbeispiel 2: Abwärmenutzung an Schachtschmelzöfen

Die Analyse der Abwärme in den Abgasen ergibt ein Potenzial von 560 MWh/a, das zur Heizungsunterstützung eingesetzt werden könnte. Die Kosteneinsparung beträgt ca. 20 000 €/a. Die Kosten für eine Wärmerückgewinnungsanlage belaufen sich auf ca. 100 000 – 2 00 000 €, so dass die Amortisationszeit bei 5 – 10 Jahren liegt.

Praxisbeispiel 3: Nutzung der Abwärme an Induktionsschmelzöfen

Für den Bereich der Abwärmenutzung ergibt die Untersuchung unter gegenwärtigen Bedingungen kein wirtschaftliches oder umsetzbares Potenzial (siehe Tabelle 10-7).

Tabelle 10-7: Einsparung durch Abwärmenutzung und Verbesserung der Wiederaufwärmung

Abwärmenutzung	Einheit	Theoretisches Potenzial	Technisches Potenzial	Wirtschaftliches Potenzial	Umsetzbares Potenzial
WRG Schmelzöfen	MW _{th} /a	16 000	sehr gering	0	
WRG Kühlwasser	MW _{th} /a	30 000	sehr gering	0	
WRG heiße Gussbolzen	MW _{th} /a	6 700	0	0	0

11 Literaturverzeichnis

- /1/ Schmid, K.-F.; Untersuchungen an einem System aus Kammerofen und Gasbrenner mit integrierter Brennerkopfkühlung und Luftvorwärmung zur Heizgaserzeugung mit breiter Temperaturvarianz. TH Aachen. 1980.
- /2/ Beier, W.; Gräfe, A.; Energieeinsparung an Industrieöfen durch verbesserte Isolierung. Stahl und Eisen 110 (1990), Nr. 11, S. 119 – 126.
- /3/ Kuhn, P; Beier, U.; Döhl, K.-W.; Thielen, S.; Auskopplung und Nutzung industrieller Abwärme mittels Thermoölsystemen an stark chargenabhängigen Aluminiumschmelzöfen. VDI Berichte Nr. 1594, 2001, S. 281 – S. 290.
- /4/ Schardt, P.; Schwarze, R.; Energieversorgungskonzept für einen aluminiumverarbeitenden Betrieb. iew elektrowärme international 54 (1996) B 3, September, S. B 125 – B 132.
- /5/ Jasper, H.D.; Einsatz von Regenerator-Brennern an Schachtschmelzöfen und 3-Kammer-Schmelzöfen. VDG 9612045, S. 303 – S. 324.
- /6/ Strasser; Schnabel; Zitzen; Monolithische Zustellung von Aggregaten in der Aluminiumindustrie 41 Int. Feuerfest Kolloquium. Aachen. 29./30. September 1998.
- /7/ Energieeinsparung und Wärmerückgewinnung in der Gießerei. Gießerei-Verlag (1989).
- /8/ Microtherm Wärmedämmstoffe, Produkt- und Leistungsdaten. Microtherm Infolyer.
- /9/ Cultimeta; Mikroporöse Dämmstoffe – Taking the heat. Cultimeta, Flexipor.
- /10/ Etzkorn, H.-W. (Hrsg.); Erdgaseinsatz in industriellen Thermoprozessanlagen. 4. Goi-Kolloquium. Vulkan-Verlag. Essen. 1999.
- /11/ Siffring, W.; Vergleich Löffel-Dosierofen im Aluminiumgießprozess. VDG 9612106.
- /12/ Herdschmelzöfen. Schmitz + Apelt LOI Industrieofenanlagen, Produktinformation. Ausg. 2004.
- /13/ Zweikammer – Schmelzöfen. Schmitz + Apelt LOI Industrieofenanlagen, Produktinformation. Ausg. 2004.
- /14/ Schobesberger, P.; Moderne Industrieöfen mit reduziertem Energieverbrauch. Gaswärme International (51) Nr. 5/2002, S. 207 – S. 212.
- /15/ Köhne, H.; Kleine Jäger, F.; Munko, A.; Diemar, W.; Low-NOx-Strahlheizrohr-Brenner für flüssige und gasförmige Brennstoffe. Gaswärme International (51) Nr. 5/2002, S. 213 – S. 221.
- /16/ Dög, A.; Walter, G.; Krause, H.; Minimierung der Wärmeverluste in Industrieöfen. Gaswärme International (51) Nr. 8/2002, S. 353 – S. 358.
- /17/ Gansen, H.; Güngör, M.; Jasper, H.-D.; Energieoptimierung einer Sekundärschmelzhütte. Gaswärme International (52) Nr. 8/2003, S. 498 – S. 501.
- /18/ Schäfer, J.; Lemperle, M.; Wieting, T.; Wilczek, M.; Stüring, H.; Friedlingsdorf, O.; Erfahrungen mit Erdgas/Sauerstoffbrenner an einem Kupolofen. Gaswärme International (52) Nr. 8/2003, S. 490 – S. 497.
- /19/ Flesch, G.; Konzeption und Auslegung moderner Schmelzöfen für die Aluminiumindustrie. Gaswärme International (52) Nr. 8/2003, S. 502 – 507.
- /20/ Strohmenger, P.; Energiesparender Herdwagenofen mit Wärmetauschensystem erfolgreich in Betrieb genommen. Gaswärme International (52) Nr. 8/2003, S. 522 – S.523.
- /21/ Irretier, O.; Brennstoffbeheizte Tiegelöfen – Technische und wirtschaftliche Aspekte. Gaswärme International (52) Nr. 5/2003, S. 268 – S. 271.
- /22/ Technische Unterlagen, Fa. Hindenlang.
- /23/ Krone, K.; Aluminiumrecycling, WA Meinke Verlag, Düsseldorf, 2000.
- /24/ DIN 12831; Verfahren zur Berechnung der Normheizlast, 11/2003.
- /25/ www.aluminium-recycling.com/ (07/2004)

- /26/ www.jaspergmbh.de/ (07/2004)
- /27/ Best Available Techniques Reference Document on Smitheries an Foundries, Version January 2004. (http://paginas.fe.up.pt/fundicao/bat/Best_available_Techniques_09-01-04.pdf)
- /28/ Stand der Technik in der Sekundäraluminiumerzeugung im Hinblick auf die IPPC-Richtlinie, Federal Environment Agency Austria, Monographien, Band 120, M-120, Wien, 2000.
- /29/ Hoffmeister, J.; Reichardt, N.; Alwast, H.; NE-Metallindustrie, Betreiberleitfaden für Anlagen zum Schmelzen von Leichtmetall, Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes NRW (Hrsg.), Düsseldorf, 1997.
- /30/ Rachwal D., MIBF and D Pennington, Metal melting with natural gas; a review for ferrous and non-ferrous foundries, The Foundrymen, Februar 1992.
- /31/ Wojciechowski, Jr. J. & Kogan M. H. (1995); UBC Flux Optimization at Imsamet, Inc. Aluminium Smelter. In; Evans, J./ed.); Light Metals 1995. The Minerals, Metals & Materials Society 1995, Warrendale, Seiten 1297 – 1299.
- /32/ Ruff, W. S.; Consultant Stade, Vortrag; Schmelze- und Krätzemanagement zur Verbesserung der Betriebsergebnisse, GDMB-HV, 18. – 20.6.2000
- /33/ European IPPC Bureau 2002, Reference Document On Available Techniques In The Non-Ferrous Metal Industries, European Comission.
- /34/ <http://www.peiler-montanwaerme.de/Waerme3.htm>.
- /35/ Firmeninfo, www.lbe-online.de/. Rekuperatorbrenner ECOMAX.
- /36/ Rachwal, D.; Pennington, D.; Metal Melting with natural gas; A review for ferrous and non-ferrous foundries. In; The Foundryman, (1992), S. 51 – 60.
- /37/ Baake, E.; Jörn, U.; Mühlbauer, A.; Energiebedarf und CO₂-Emission industrieller Prozesswärmeverfahren. Vulkan-Verlag. Essen.1996.
- /38/ Kramer, C.; Mühlbauer, A.; Praxishandbuch Thermoprozesstechnik. Band 1. Vulkan-Verlag. Essen. 2002.
- /39/ Kramer, C.; Von Strack, A.; Mühlbauer, A.; Praxishandbuch Thermoprozesstechnik. Band 2. Essen. Vulkan-Verlag. 2003.
- /40/ Niedertemperaturverstromung mittels einer ORC-Anlage im Werk Lengfurt der Heidelberger Zement AG, Veröffentlicht vom Landesamt für Umweltschutz Augsburg im August 2001.
- /41/ Publikationen auf den Interseiten des Landesamtes für Umweltschutz, Bayern Galvinik.pdf, Papierindustrie.pdf
- /42/ Stephan W., K. Zitzmann, G. Pröbstle, J. Kapischke: Effiziente Energieverwendung in der Industrie, Teilprojekt Metallschmelzbetriebe, Zwischenbericht im Auftrag des Landesamtes für Umweltschutz, LFU, Juli 2004.
- /43/ Niedertemperaturverstromung mittels einer ORC-Anlage im Werk Lengfurt der Heidelberger Zement AG, Landesamt für Umweltschutz Bayern, August 2001
- /44/ Publikationen auf den Interseiten des Landesamtes für Umweltschutz, Bayern, Galvinik.pdf, Papierindustrie.pdf
- /45 / Kramer, C.; Von Strack, A.; Mühlbauer, A.; Praxishandbuch Thermoprozesstechnik. Band 2. Essen. Vulkan-Verlag 2003.
- /46 / Brunklaus, J. Henri; Stepanek, F. Josef; Industrieöfen Bau und Betrieb. 6. Auflage. Vulkan-Verlag Essen. 1994.
- /47 / Webpages der Firma Nabertherm. www.nabertherm.de/ (07/2004)
- /48 / Webpages der Firma Hindelang. www.hindenlang.de/ (07/2004)
- /49 / Webpages der Firma Kromschröder. www.kromschroeder.de/ (07/2004)
- /50 / Webpages der Firma Küppersbusch. www.kueppersbusch.de (07/2004)
- /51 / www.flox.com/ (07/2004)

- /52/ Baake, E.; Energie- und Umweltbetrachtungen beim Schmelzen im Induktionstiegelofen. Gießerei 90, 6/2003, S. 122 – S. 126.
- /53/ Baake, E.; Dötsch, E.; Drees, G.W.; Nacke, B.; Verfahrenstechnische Wirkungen der Badbewegung im Induktions-Tiegelofen. elektrowärme international, Heft 3/2000, September, S. 109 – S. 117.
- /54/ Baake, E. und Mühlbauer, A.; Ressourcenschonende Energienutzung mittels Elektrowärme. ETG Fachbericht 16, 1996.
- /55/ Bebber, H.; Spitz, W.; Kontinuierliches Schmelzen feuchter Späne
- /56/ Behrens, T.; Baake, E.; Kostenreduzierung durch betriebliches Lastmanagement in einer Gießerei. elektrowärme international, Heft 3/2002, September, S. 96 – S. 101.
- /57/ Faets, W.; Gießerei 87 (2000) 12.
- /58/ Friesenecker, F.; Stromkostenoptimierung bei der Anwendung von Elektrowärme in Gießereien. Gießerei 80 (1993), Nr. 7, 5. April, S. 216 – S. 220.
- /59/ Hammer, R. Praktikumsbericht FH Ansbach, 2003.
- /60/ Heinen, K.-H., Elektrostahlerzeugung. Verlag Stahleisen Düsseldorf 1997.
- /61/ Kramer, C.; Mühlbauer, A.; Praxishandbuch Thermoprozesstechnik. Band 1. Vulkan-Verlag. Essen. 2002.
- /62/ Nacke, B.; Idziok, K.-H.; Walther, A.-M.; Entwicklung der neuen effizienten und leistungsstarken Rinneninduktoren zum wirtschaftlichen Schmelzen von Kupferlegierungen. elektrowärme international, Heft B1, März 1999, S. B13 – B19.
- /63/ Phillips, G.; Induktionsöfen für Kupfer und Kupferlegierungen.
- /64/ Firmeninfo; StrikoMeltor StrikoWestofen GmbH, 2004.
- /65/ Naumann, T.: Infomaterial. Gießereieinrichtungen. 25.03.2004.
- /66/ StrikoWestofen: Betriebsanleitung
- /67/ LOI: Firmenpublikation
- /68/ Jasper, H.-D.: Einsatz von Regenerator-Brennern an Schachtschmelzöfen und 3-Kammerschmelzöfen. In: VDG 96 12 045, S. 303 – S. 324.
- /69/ Lipinski, D.; Auskleidung von Öfen zum Schmelzen und Warmhalten von Aluminium und seinen Legierungen. 41. Internationales Feuerfestkolloquium, S. 67 – S. 70.
- /70/ Webpages des VDEW. www.vdew.de (07/2004)
- /71/ Webpages der Firma induga. www.induga.de (07/2004)
- /72/ Webpages der Firma EDF. www.edf.com (07/2004)
- /73/ Kuhn, P.; Beier, U.; Döhl, K.W.; Thielen, S.: Auskopplung und Nutzung industrieller Abwärme mittels Thermoölsysteme an stark chargenabhängigen Aluminium-Schmelzöfen, VDI-Bericht Nr. 1594, 2001.
- /74/ Webpages der Firma Peiler Montanwärme. www.peiler-montanwaerme.de