



FOTO: © ROLF NACHBAR FOTOGRAFIE

Abguss eines Mittelfrequenzofens in mehreren Portionen nach energieintensivem Schmelzen im Hinblick auf das physikalische Optimum und die momentane Effizienz.

Energieeffizienter Induktionsofenbetrieb durch Annäherung an das physikalische Optimum

Um Metalle gemäß dem Gedanken der Kreislaufwirtschaft erneut nutzbar zu machen, ist der Mittelfrequenzofen (MFO) nicht nur metallurgisch bestens geeignet, sondern auch vergleichsweise energieeffizient. Bestehende Optimierungspotenziale dürfen vor dem Hintergrund der gesteckten Energie- und Klimaziele nicht ungenutzt bleiben. Grenzwertorientierte Bewertungsmethoden, wie die des physikalischen Optimums, ermöglichen die Bestimmung der theoretisch maximal möglichen Energieeinsparung und liefern so einen unveränderlichen Benchmark für Verbesserungsmaßnahmen. Mittels der Analyse der momentanen Effizienz des Ofens können Potenziale im zeitlichen Betriebsablauf in Bezug auf das physikalische Optimum identifiziert werden.

Das Wiedereinschmelzen von Metallrückläufen und Schrotten ist sowohl im Sinne der Kreislaufwirtschaft rentabel als auch zur Schonung wichtiger Rohstoffressourcen unabdingbar. Als Schmelzaggregat stellt der Mittelfrequenzofen (MFO) hierzu die aktuell beste verfügbare Technik gegenüber anderen Schmelztechnologien, wie beispielsweise Kupolöfen dar, weil er sowohl metallurgisch als auch energetisch vorteilhaft ist [1]. Für die Effizienzbewertung wird das physikalische Optimum (PhO) als Benchmark verwendet. Es ist als der unter physikalischen, biologischen und chemischen Randbedingungen theoretisch optimale Referenzprozess definiert [2].

Neben dem physikalischen dient das technische Optimum als Referenzwert, um das realisierbare technische Verbesserungspotenzial zu bestimmen, denn das technische Optimum entspricht der aktuell besten verfügbaren Technik (BVT). Der Ist-Zustand kann somit bestenfalls dem technischen Optimum entsprechen, jedoch niemals dem PhO. Für die hier durchgeführte Analyse werden in den BVT-Merkblättern fehlende Kennzahlen für das technische Optimum gegebenenfalls durch die besten in der Literatur dokumentierten Daten ergänzt.

Physikalischer Mindestenergieaufwand

Für das Schmelzen von Metallen ist unabhängig von der Schmelztechnologie physikalisch begründet jeweils ein bestimmter Mindestenergieaufwand erforderlich, der üblicherweise anhand der Enthalpiedifferenz zwischen dem Einsatzmaterial und der heißen Schmelze bestimmt wird. Dabei fließen die Enthalpien der Einsatzmaterialien bei Umgebungstemperatur (Input) sowie die des erzeugten flüssigen Schmelzgutes beim Verlassen des Ofens (Output) in die Berechnung ein. Bild 1 zeigt die Enthalpiekurven verschiedener Stoffe in Abhängigkeit der Temperatur, wobei die Enthalpiesprünge Gefüge- und Phasenübergänge anzeigen. Zur Berechnung des PhO wird von idealen Einsatzstoffen ausgegangen. Diese Reinstoffe haben bei Umgebungstemperatur einen Enthalpiewert von Null.

Einflussfaktor Einsatzstoffe

Die Enthalpiedifferenz von reinem Eisen (Fe) zwischen 1500 °C und dem Um-

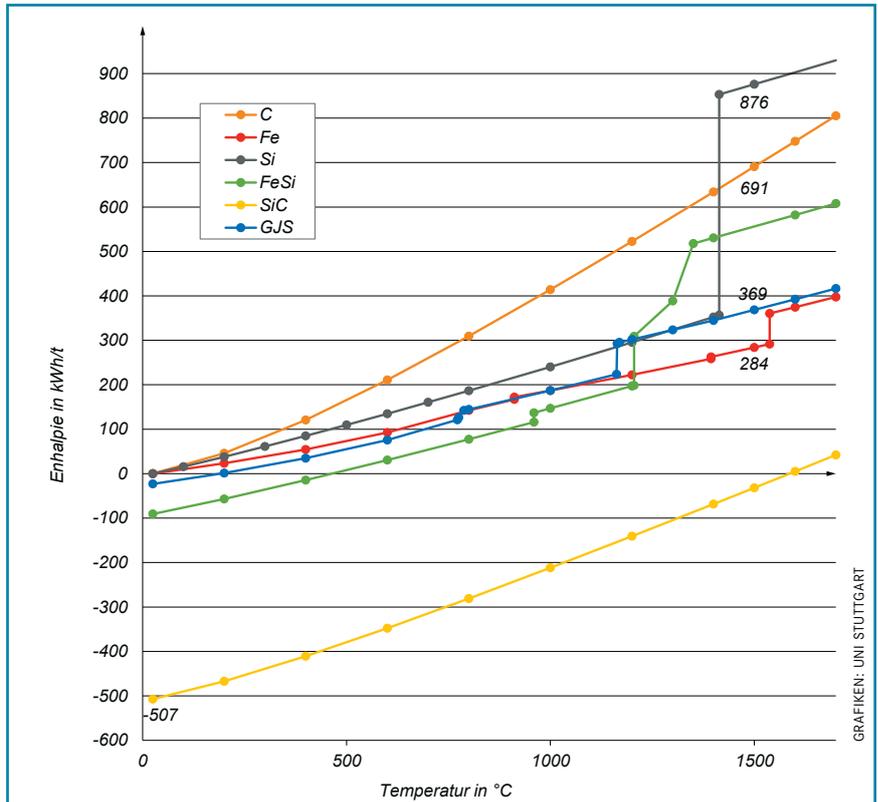


Bild 1: Spezifische Enthalpiewerte von Kohlenstoff (C), Eisen (Fe), Silicium (Si), Ferro-silicium (FeSi), Siliciumcarbid (SiC) und GJS in Abhängigkeit der Temperatur, eigene Darstellung nach [4].

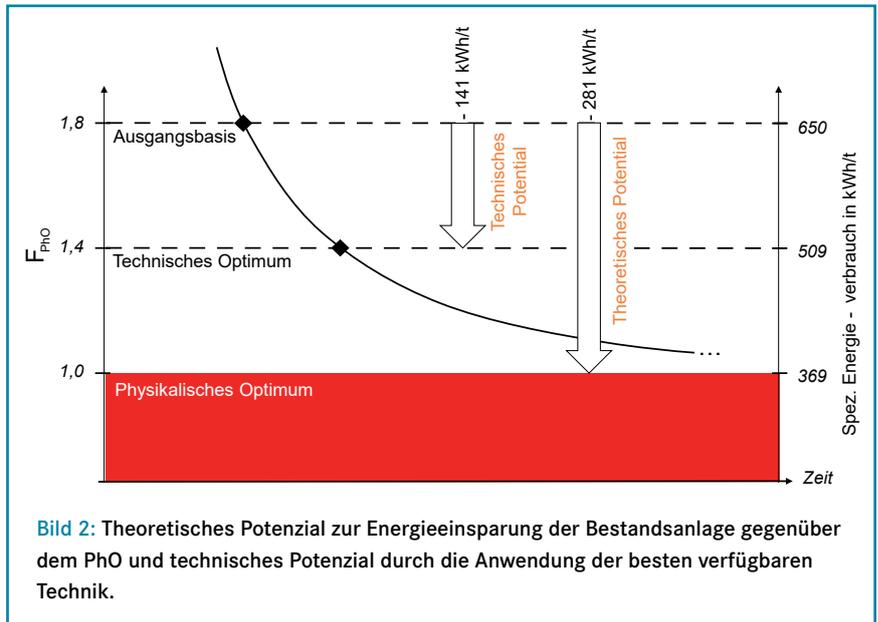
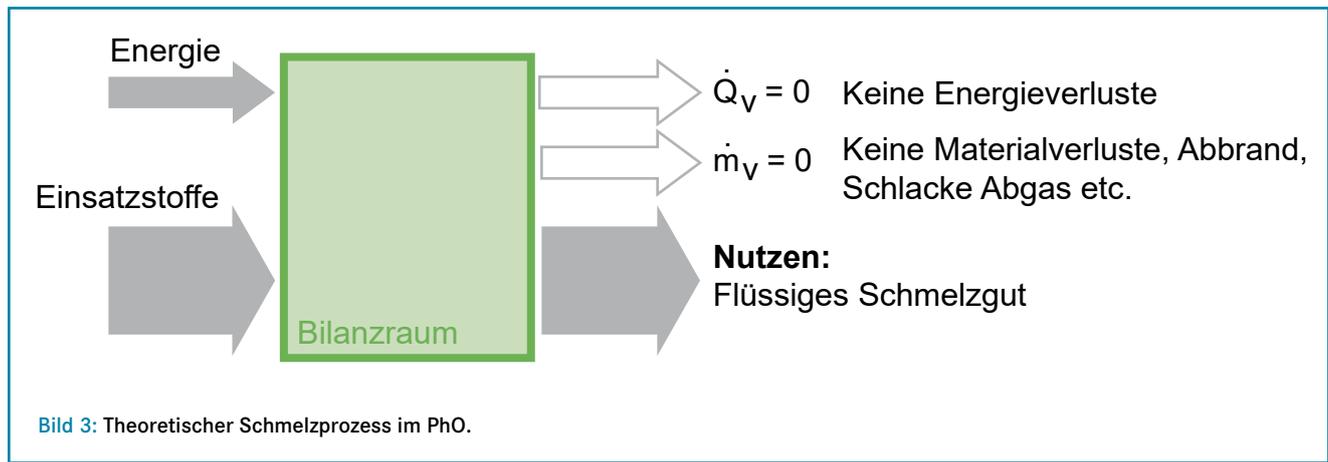


Bild 2: Theoretisches Potenzial zur Energieeinsparung der Bestandsanlage gegenüber dem PhO und technisches Potenzial durch die Anwendung der besten verfügbaren Technik.

gebungszustand bei 25 °C beträgt 284 kWh / t, von Silizium (Si) ca. 876 kWh / t und von Kohlenstoff (C) 691 kWh / t (s. Bild 1). Für Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS) mit 3,7 % C und 1,8 % Si ergibt sich somit als PhO eine Enthalpiedifferenz zwischen dem Endprodukt bei 1500 °C und den Einsatzstoffen bei Umgebungstemperatur von ca. 369 kWh pro Tonne Schmelzgut.

In der Literatur wird ein Wert von 387 kWh / t für den Mindestenergieaufwand für das Erhitzen von GJS auf 1500 °C bei Zugabe von Siliziumcarbid (SiC) angegeben [3]. Bei Zugabe von molmassenbedingt 2,6 % SiC anstelle von 1,8 % reinem Si ergibt sich gegenüber dem Mindestaufwand für GJS ein Mehraufwand von ca. 13 kWh pro Tonne Schmelzgut, d. h. ein Energieaufwand von 382 kWh / t,



da SiC bei Umgebungstemperatur eine negative Enthalpie (-507 kWh / t) aufweist. Im Folgenden wird jedoch das PhO von 369 kWh pro Tonne Schmelzgut als Mindestenergieaufwand verwendet, da dieser auch bei der Substitution des SiC durch Ferrosilizium (FeSi) den unveränderlichen Grenzwert darstellt.

Einflussfaktor Schmelzofen

Der Energieaufwand für den Schmelzprozess ist zudem in der Praxis auch höher als der Mindestaufwand im PhO, weil es ebenso wenig einen physikalisch optimalen Schmelzofen gibt wie reinste Einsatzstoffe existieren. Der physikalisch optimale MFO müsste unter anderem eine adiabate Tiegelwand, eine verlustfreie Stromversorgung und eine supraleitende Spule umfassen, was technisch nicht realisierbar ist.

Die beschriebene Analyse wurde am Beispiel eines realen MFO durchgeführt [4]. Der spezifische Energieverbrauch von ca. 650 kWh pro Tonne Produkt im Verhältnis zum Mindestenergieaufwand im PhO bildet den PhO-Faktor von 1,76 als die zentrale Leistungskennzahl der Methode des PhO. Derzeit wird somit 1,76 mal so viel Energie aufgewendet als theoretisch erforderlich wäre. Das heißt, das theoretische Potenzial zur maximalen Energieeinsparung pro Tonne GJS-Schmelze entspricht 0,76-mal dem Mindestaufwand und somit ca. 281 kWh. Dies zeigt die physikalische Grenze des Potenzials zur Effizienzsteigerung als Beitrag zu einer umweltfreundlicheren Produktion auf. Zur Erreichung der gesetzten Klimaziele sind zusätzlich zur Effizienzsteigerung weitere Maßnahmen wie die Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Energien oder andere Kompensationsmaßnahmen erforderlich.

Bild 2 zeigt das theoretische und derzeitige technische Effizienzpotenzial des betrachteten MFO. Ein technisch optimaler MFO hat gegenwärtig einen System-

nutzungsgrad von etwa 75 %, der sich auf den theoretischen Energiebedarf (ca. 382 kWh / t) bei Zugabe von SiC bezieht [3, 8]. Das heißt, im technischen Optimum werden für das Schmelzen von GJS bei Zugabe von SiC ca. 509 kWh pro Tonne Schmelzgut aufgewendet. Durch Effizienzmaßnahmen nähert sich der reale Energieverbrauch der Bestandsanlage im Laufe der Zeit dem technischen Optimum an. Währenddessen verschiebt sich das technische Optimum durch den technischen Fortschritt asymptotisch in Richtung des physikalischen Optimums. Das technische Optimum ist daher nur ein momentaner, jedoch veränderlicher Grenzwert, der als Benchmark dienen kann.

Der physikalisch optimale Mittelfrequenzofen

Der Bilanzraum für die durchgeführte Analyse des MFO umfasst die Stromversorgung von der Primärseite des Ofentransformators bis zur Induktionsspule sowie dem Ofentiegel. Die folgende Untersuchung bezieht sich einzig auf die Optimierung des MFO als Teilsystem einer Gießerei. Bei der physikalisch besten Version eines Schmelzprozesses treten keine Energie- oder Materialverluste auf (Bild 3). Die gesamte Energie- und Materialzufuhr wird in einen Nutzen überführt, was in diesem Fall das heiße Schmelzgut ist, das bestimmte Qualitätsanforderungen erfüllen muss. Um dies zu erreichen, müssen die Komponenten des MFO bestimmte Eigenschaften haben, sodass sie jeweils physikalisch optimal arbeiten. Für das PhO müsste die Stromversorgung ohne Ohmsche Verluste erfolgen. Der Jousche Widerstand der elektrotechnischen Bauteile beträgt im PhO null und der elektrische Nutzungsgrad 100 % [2].

Die Induktionsspule des MFO dient dazu, elektrische Energie zunächst in magnetische Feldenergie und anschließend

in innere Energie des Schmelzgutes umzuwandeln. Die physikalisch optimale Spule müsste die folgenden Eigenschaften besitzen, um die zugeführte elektrische Energie im PhO verlustfrei in magnetische Energie umzuwandeln:

- > supraleitende Spule, d. h. kein elektrischer Spulenwiderstand,
- > keine Reibung durch Schwingungen der Spule durch die Lorenzkraft oder eine Spule als starrer Körper im Sinne der Starrkörpermechanik,
- > vollständige Abschirmung des Magnetfelds in das Zielgebiet oder ein elektrischer Widerstand von null außerhalb des Zielgebiets.

Auf diese Weise erreicht die Induktionsspule im PhO theoretisch einen elektrischen Nutzungsgrad von 100 %.

Im PhO werden auch Wärmeverluste nicht berücksichtigt. Nach der Methode des PhO ist der Ofeninnenraum als ein adiabates System zu betrachten, d. h. ein System, das trotz einer Temperaturdifferenz gegenüber der Umgebung keine Wärme abgibt [2]. Es wird bei der Betrachtung von einer idealen Wärmedämmung ausgegangen. In der Praxis kann die spezifische Wärmeverlustmenge durch eine Verbesserung der Wärmedämmung oder das Minimieren der Prozesszeit verringert werden. Der theoretische Grenzwert für die Chargendauer ist null.

Diese Überlegungen, die der Ermittlung des PhO zugrunde liegen, sind natürlich rein theoretisch und stellen für die Praxis lediglich eine Orientierung dar.

Ist-Zustand der Effizienz

Mittels der leistungsbezogenen Prozessbewertung kann die momentane Effizienz des Chargenvorgangs unter Berücksichtigung der Auslastung und somit die Fahr- und Betriebsweise des MFO analysiert werden [5]. Dies erfolgt durch eine kontinuierliche oder intervallbezogene Analyse

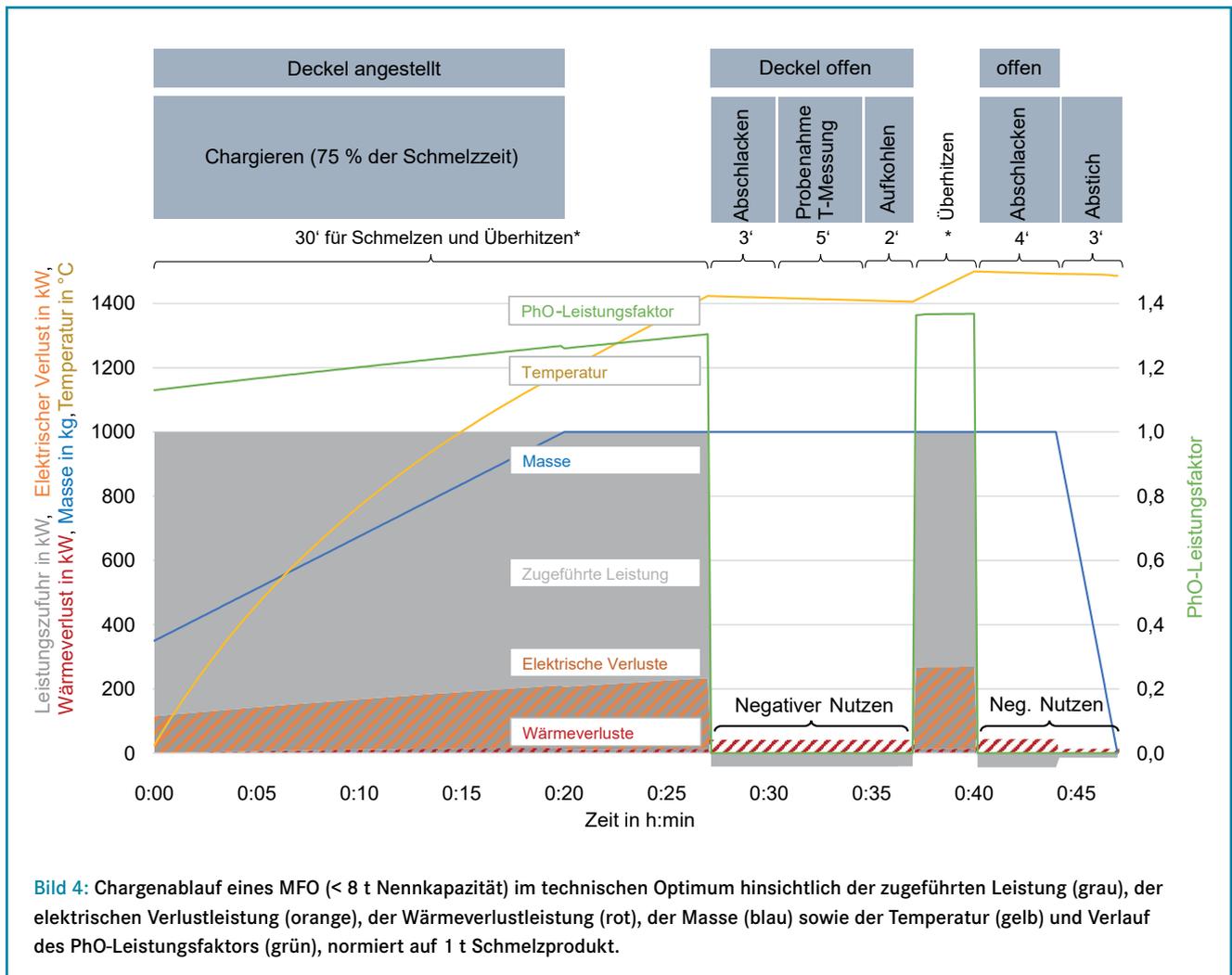


Bild 4: Chargenablauf eines MFO (< 8 t Nennkapazität) im technischen Optimum hinsichtlich der zugeführten Leistung (grau), der elektrischen Verlustleistung (orange), der Wärmeverlustleistung (rot), der Masse (blau) sowie der Temperatur (gelb) und Verlauf des PhO-Leistungsfaktors (grün), normiert auf 1 t Schmelzprodukt.

der zugeführten Leistung im Verhältnis zum momentan erzielten Nutzen. Dieses Verhältnis entspricht dem PhO-Leistungsfaktor, dessen Berechnung allerdings nur dann sinnvoll ist, wenn sowohl Dividend als auch Divisor größer als null sind.

Der momentane Aufwand entspricht im Fall des MFO der zugeführten elektrischen Leistung. Der momentane Nutzen des MFO ist die Enthalpieänderung des Schmelzgutes, d. h. die vom Schmelzgut aufgenommene Leistung. Dies bedeutet, dass ein Abkühlen bzw. eine Enthalpieabnahme während des Chargenintervalls einem negativen Nutzen entspricht. Diese Enthalpieabnahme muss zu einem späteren Zeitpunkt durch einen zusätzlichen positiven Nutzen bzw. eine Enthalpiezunahme wieder kompensiert werden, um den erforderlichen Enthalpiezustand des Schmelzgutes am Ende des Chargenintervalls zu erreichen.

Betriebsweise eines MFO im technischen Optimum

Der zeitliche Ablauf einer Charge des realen MFO kann nicht mit dem theoretischen

MFO im PhO verglichen werden, da die Mindestchargendauer durch keine physikalischen Gesetze beschrieben werden kann. Aus diesem Grund wird für die folgende Untersuchung das technische Optimum anhand der besten verfügbaren Techniken definiert. Diese erfordern einen bestimmten technischen Mindestenergieaufwand und ermöglichen einen technisch optimalen Chargenablauf. Daher wird zunächst der Betriebsablauf eines MFO im technischen Optimum betrachtet.

Chargendauer

Die Schmelzdauer eines MFO mit einer Leistungsdichte von 1 MW pro Tonne Schmelzgut beträgt im technischen Optimum ca. 30 min [6]. Dies ergibt sich aus der Mindestenergiezufuhr von ca. 509 kWh pro Tonne Produkt im technischen Optimum und aus der maximalen Leistungsdichte. Der Leistungseinbruch im Bereich der Curie-Temperatur wird bei einer quasikontinuierlichen Beschickung im technischen Optimum vernachlässigt. Daher wird für das technische Optimum von einer konstanten Nennleistungszufuhr von 1 MW pro Tonne Schmelzgut ausgegan-

gen. Zusätzlich zur Schmelzzeit umfasst die Chargendauer im technischen Optimum Nebenzeiten von ca. 17 min [7, 8]:

- > 7 min für das Abschlacken,
- > 2 min für die Temperaturmessung,
- > 3 min für die Probenahme,
- > 2 min für das Aufkohlen,
- > 3 min für das Abgießen.

Der Abstich erfolgt in eine Pfanne mit der Kapazität des gesamten Ofeninhalts. Daraus ergibt sich eine Chargendauer von ca. 47 min für das technische Optimum. Diese Angaben gelten nur für Einzel- und nicht für Tandem-Anlagen. Die Zeit des Zurückkippen des Ofens und des ersten Chargierens von ca. 2 min bleibt im Folgenden unberücksichtigt, da in dieser Zeit keine Leistungszufuhr stattfindet.

Elektrischer Wirkungsgrad

Vereinfachend wird angenommen, dass die elektrischen Umwandlungsverluste der Stromversorgungskomponenten proportional der zugeführten Leistung sind. Bei einem Gesamtwirkungsgrad von Umrichter, Kondensator und Zuleitungen von insgesamt ca. 94,4 % und einem Wirkungs-

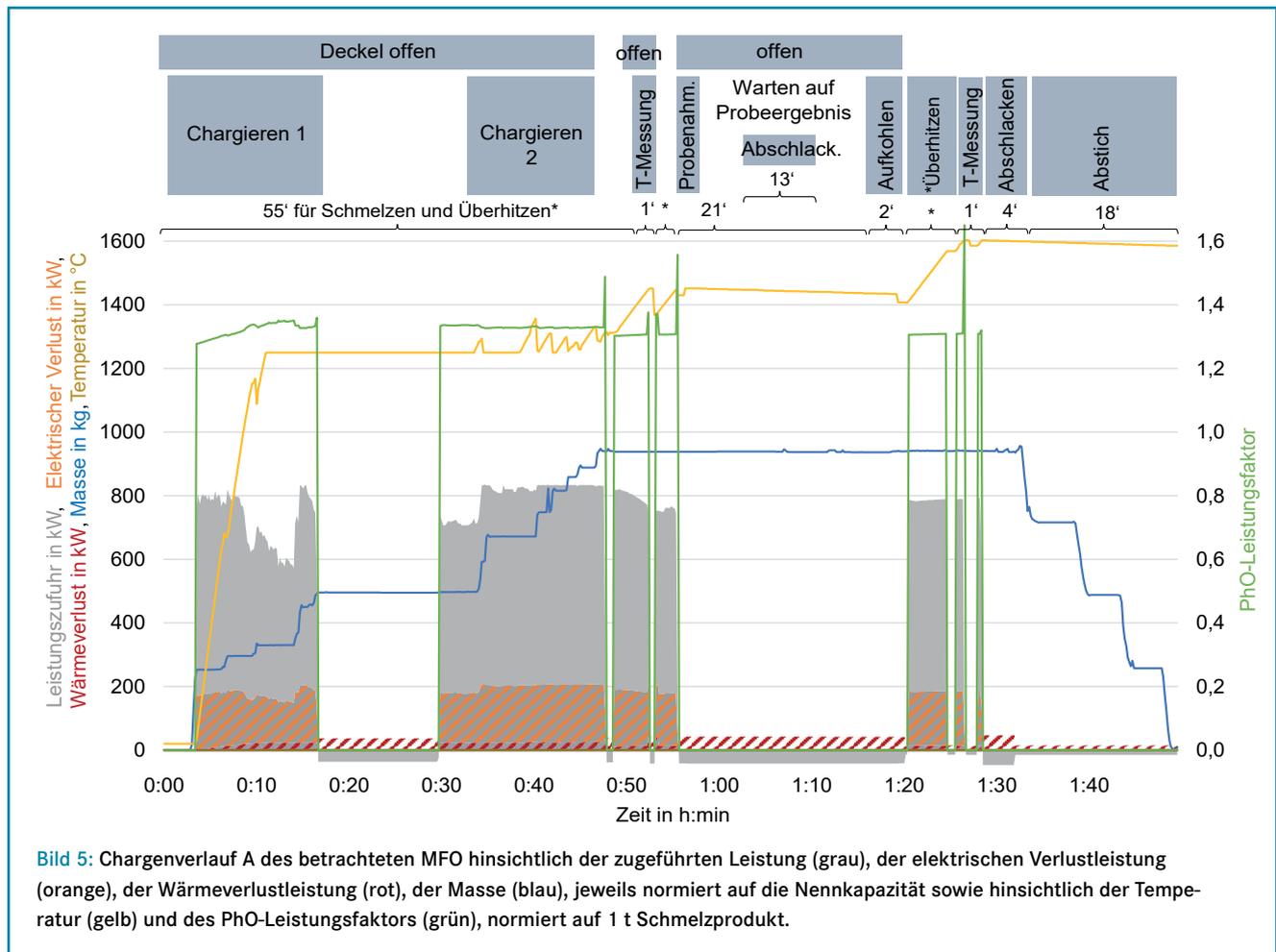


Bild 5: Chargenverlauf A des betrachteten MFO hinsichtlich der zugeführten Leistung (grau), der elektrischen Verlustleistung (orange), der Wärmeverlustleistung (rot), der Masse (blau), jeweils normiert auf die Nennkapazität sowie hinsichtlich der Temperatur (gelb) und des PhO-Leistungsfaktors (grün), normiert auf 1 t Schmelzprodukt.

grad des Transformators von ca. 98,5 % ergibt sich ein Verlust der Stromversorgungskomponenten von ca. 7 % der Leistungszufuhr in das System [8]. Hingegen nimmt der Wirkungsgrad der Induktionsspule im zeitlichen Verlauf einer Charge durch den zunehmenden Anteil an flüssigem Schmelzgut im Tiegelofen im Verhältnis zum festen Einsatzgut ab [9].

Wärmeverluste

Demgegenüber sind die Wärmeverluste von der zugeführten elektrischen Leistung nahezu unabhängig. Sie werden im Wesentlichen durch die Temperatur und die Ofengröße beeinflusst und davon, ob der Ofendeckel geöffnet oder geschlossen ist und ob chargiert oder abgegossen wird. Im Folgenden wird von einem Wärmeverluststrom von 14 kW pro Tonne Schmelzgut bei geschlossenem, von 44 kW / t bei geöffnetem Deckel sowie von 21 kW / t während des Chargierens und während des Abstichs ausgegangen, jeweils bezogen auf eine Ofeninnentemperatur von 1500 °C [8]. Für die grafische Darstellung (Bilder 4 und 5) werden die Wärmeverluste in proportionaler Abhängigkeit von der Ofeninnentemperatur berechnet. Für eine genauere Analyse muss der Strahlungsanteil an der Wärmeübertragung, der sich

mit T^4 verändert, berücksichtigt werden. Zudem wird die Temperaturzunahme in Abhängigkeit der zugeführten Leistung und der im Ofen befindlichen Masse über die Zeit berechnet. Dies erfolgt näherungsweise anhand einer gemittelten Wärmekapazität als Quotient aus Enthalpedifferenz und Temperaturdifferenz.

Schüttdichte

In Abhängigkeit der Schüttdichte kann eine bestimmte Masse an Einsatzmaterial in den leeren Ofen gefüllt werden. Für die Berechnung wird von einer Packungsdichte des Einsatzgutes von 2,5 t / m³ im technischen Optimum ausgegangen [9]. Hierfür ist der physikalische Grenzwert die Dichte von Gusseisen von ca. 7 t / m³.

Chargenzyklus im technischen Optimum

In Bild 4 ist der vereinfachte Chargenzyklus eines MFO im technischen Optimum mit einer Kapazität von weniger als 8 t Gusseisen und einer Nennleistungsdichte von 1 MW pro Tonne Füllkapazität dargestellt. Hierbei sind Verzögerungen, die durch einen Tandembetrieb entstehen vernachlässigt, obwohl die Tandemanordnung verbreitet und notwendig zur kontinuierlichen Flüssigkeitsversorgung ist [9, 10]. Die

Massenzunahme ist normiert (blau) auf eine Tonne dargestellt. Sobald eine Leistungszufuhr erfolgt, wird kontinuierlich nachchargiert, was in der Praxis lediglich stufenweise erfolgt und in der Grafik vereinfachend zu einer konstanten Steigung führt. Die Temperatur (gelb) steigt aufgrund der zunehmenden Schmelzgutmasse mit der Zeit flacher an. Nach ca. 27 min Leistungszufuhr folgt die Temperaturmessung, die Probenahme, das Aufkohlen und das Abschlacken. Es ist anzumerken, dass diese Schritte in der Praxis auf mehrere Zeitintervalle aufgeteilt werden.

Nach dem Überhitzen vor dem Abguss hat das Schmelzgut eine Temperatur von 1500 °C. Die orange gestreifte Fläche kennzeichnet den leistungsabhängigen, elektrischen Verluststrom, der durch die Stromversorgung verursacht wird. Die rot gestreifte Fläche kennzeichnet den Wärmeverluststrom, der ebenso in den Zeitintervallen auftritt, in denen keine Leistung zugeführt wird. Außerdem wird die Temperaturabhängigkeit der Wärmeverluste am Chargenbeginn deutlich. Das Integral über die zugeführte Leistung, d. h. grafisch der graue Bereich inklusive der rot- und orangegestreiften Flächen, entspricht der zugeführten Energie. Die graue Fläche ohne die gestreiften Flächen entspricht der

Energie, die dem Schmelzgut als Nutzen zugeführt wird und ist als der Verlauf des momentanen Nutzens zu verstehen. Da jedoch in den Zeitintervallen ohne elektrische Leistungszufuhr ebenfalls Wärmeverluste auftreten, entspricht die graue negative Fläche in diesem Fall derjenigen Energie, die dem Schmelzgut wieder entzogen wird. Der momentane Nutzen ist in diesen Zeitintervallen negativ. Das Integral über die graue Fläche ergibt somit unter Berücksichtigung des negativen Nutzens den absoluten Betrag des Nutzens. Darüber hinaus sind weitere Verluste in der grauen Fläche enthalten, die durch eine suboptimale Fahr- und Betriebsweise entstehen, wie Mehrverbräuche durch verrostetes, sandiges Einsatzmaterial oder durch sonstige Schrottverunreinigungen. Die graue Fläche ist daher nur näherungsweise als die Mindestenergiezufuhr im PhO zu verstehen.

In Grün ist der PhO-Leistungsfaktor dargestellt. Wenn keine elektrische Leistung zugeführt wird, beträgt er Null. Dass der Leistungsfaktor kleiner als der PhO-Faktor ist, liegt daran, dass in den Zeitintervallen ohne Leistungszufuhr weiterhin Wärmeverluste auftreten, d. h. ein negativer momentaner Nutzen auftritt, was zu einem späteren Zeitpunkt kompensiert werden muss. Die Kompensation ergibt sich durch eine Verlängerung der Leistungszufuhr, was den PhO-Leistungsfaktor nicht beeinflusst bzw. an ihm nicht erkennbar wird. Entsprechend ergibt sich der PhO-Faktor auch nicht als der Mittelwert des Verlaufs des PhO-Leistungsfaktors. Die Bedeutung des PhO-Leistungsfaktors muss in diesem Fall hinterfragt werden, da der momentane Aufwand als Dividend in einigen Zeitintervallen Null beträgt. Die Verluste in diesen Zeitintervallen werden anhand des PhO-Leistungsfaktors nicht ersichtlich. Aus diesem Grund ist es bei der zeitlichen Darstellung wichtig, zusätzlich zum PhO-Leistungsfaktor die als Aufwand zugeführte Leistung sowie die als Nutzen aufgenommene Leistung, die kleiner Null sein kann, zu berücksichtigen und darzustellen.

Beispielhafter Vergleich einer Bestandsanlage

Die entsprechenden Daten des realen, betrachteten MFO wurden vor Ort erhoben, um dessen Verluste durch die Betriebs- und Fahrweise zu ermitteln [5]. Das Ergebnis der Datenauswertung ist in Bild 5 für eine repräsentative Charge dargestellt. Die Berechnungen der elektrischen und thermischen Verluste und die des PhO-Leistungsfaktors erfolgt analog

zu den Berechnungen in Bild 4.

Die Chargendauer von 47 min im technischen Optimum (vgl. Bild 4) wird von der Bestandsanlage mit einer Dauer der Beispielcharge von 108 min deutlich überschritten. Die Dauer für das Schmelzen und Überhitzen beträgt ca. 55 min. Dies ist unter anderem auf eine höhere Überhitzung bis auf 1600 °C gegenüber 1500 °C zurückzuführen, was einen Zusatzverbrauch von mindestens 24 kWh pro Tonne Produkt verursacht. Außerdem beträgt die Nennleistungsdichte 0,8 MW pro Tonne Gusseisen anstelle von 1 MW/t, was zu einer längeren Aufheizzeit führt. Der zusätzliche Zeitaufwand von ca. 11 min durch das Nachgattieren ist ebenfalls deutlich zu erkennen. In dieser Zeit treten Wärmeverluste auf, die anschließend eine zusätzliche Leistungszufuhr erfordern und die Chargendauer verlängern. Der Zeitbedarf für die Temperaturmessung beträgt maximal 2 min wie im technischen Optimum.

Der Ofenprozessor zeigt kontinuierlich die Temperatur an (gelb). Von Beginn an berechnet dieser Schmelzprozessor die Temperatur des Schmelzguts in Abhängigkeit der zugeführten Leistung, der Masse und dem Nennwirkungsgrad des Ofens. Nach der ersten Messung wird der errechnete Wert durch den realen Messwert ersetzt, auf dessen Basis die weitere Berechnung erfolgt. Die erste Temperaturmessung ergibt eine geringere Temperatur als vom Schmelzprozessor berechnet. Dies ist an dem Temperaturabfall nach der Temperaturmessung zu erkennen, was sonst nur während des Chargiervorgangs durch eine Zugabe von kaltem Einsatzgut bewirkt wird. Die zweite Messung ergibt nur einen gering niedrigeren Wert der gemessenen im Vergleich zur errechneten Temperatur. Das deutet darauf hin, dass nach der ersten Messung weniger Energieverluste auftreten, die nicht vom Prozessor bei der Temperaturberechnung berücksichtigt werden.

Eine deutlich längere Zeit wird in der Praxis mit 21 min für die Probenahme und -auswertung benötigt, gegenüber 3 min im technischen Optimum. Diese Wartezeit wird teilweise zum Abschlacken genutzt. Erkennbar ist auch der stufenweise Abguss, der dadurch bedingt wird, dass die Pfanne nur jeweils 25 % des Ofeninhalts fasst. Dadurch entsteht eine deutlich längere Gesamtastichdauer von 18 min.

Maßnahmen zur Energieeinsparung lassen sich daraus teilweise direkt ableiten oder über einen Vergleich mit dem technischen Optimum identifizieren. Umfangreiche Maßnahmen zur Energieeffizienz sind auch in der Literatur aufgeführt [7, 9, 11,

UNSERE SCHNÜRE HALTEN

HÖCHSTEN ANSPRÜCHEN



DIKAFLEX

Abdichtungen

- Formen
- Pfannen
- Strangguss
- Konverter
- 3 - 30 mm stark

Foto: © sonsedskaya / Fotolia

QUALITÄT AUS
ÜBERZEUGUNG!

KBO



www.kbo-gmbh.de
Fon 02045 - 9619 - 0

Tabelle 1: Enthalpiedifferenzen verschiedener Legierungen bezogen auf die jeweilige Schmelztemperatur und eine Umgebungstemperatur von 25 °C [3].

Legierung	Bestandteile in %	Schmelztemperatur in °C	Energieverbrauch im PhO, Enthalpiedifferenz in kWh/t
G - X 20 Cr 14	Fe 78,26/C 0,2/FeCr 21,54	1600	373
GJS	Fe 94,5/C 3,7/Si 1,8	1400	368
Legiertes Gusseisen	Fe 73/C 3/Si 2/Ni 22	1400	367
Ferrosilizium	Fe 25/Si 75	1400	621
Ferromangan	Fe 25/Mn 75	1400	341
Messing	Cu 63/Zn 37	1000	149
Al-Legierung	Al 90/Si 6/Cu 4	700	320
Al-Legierung	Al 92/Cu 5/Mg 2	700	306
Al-Legierung	Al 94/Zn 5/Mn 1	700	305
Al-Legierung	Al 95/Mg 5	700	307
Al-Legierung	Al 88/Si 12	650	323

12]. Hinsichtlich der betrachteten Bestandsanlage könnten Energieeinsparungen in erster Linie durch eine Reduzierung der Wärmeverluste erreicht werden, indem die Chargendauer verkürzt wird, unter anderem beim Nachgattieren, der Probennahme und dem Abstich. Weitere potenzielle Effizienzmaßnahmen sind eine Bedarfsregelung der Absaugung oder die Umstellung des Einkaufs an Einsatzmaterialien. Das größte Effizienzpotenzial bietet im vorliegenden Betrieb allerdings nicht der analysierte Ofen selbst, sondern die Optimierung der Taktung zwischen Schmelzbetrieb und Formanlage, da es durch den nachgelagerten Prozess oft zu Verzögerungen beim Abguss und damit zu zusätzlichen Warmhaltephasen im MFO kommt.

Fazit

Bei der Analyse eines realen Induktionsofens mit einem spezifischen Energieverbrauch von 650 kWh pro Tonne Produkt konnte ein technisches Einsparpotenzial von 141 kWh / t gegenüber dem technischen Optimum sowie ein theoretisches Einsparpotenzial von 281 kWh / t gegenüber dem physikalischen Optimum aufgezeigt werden. Nach der Methode des physikalischen Optimums ergibt sich ein PhO-Faktor von 1,76 als zentrale Leistungskennzahl. Derzeit wird das 1,76-fache der theoretisch notwendigen Energie aufgewendet (Bild 2). Üblicherweise wird der Energieverbrauch von Bestandsanlagen bereits mit dem thermodynamischen Mindestenergieaufwand verglichen und die Literaturwerte für verschiedene Gusswerkstoffe (Tabelle 1) liegen in den Gießereien vor. Darüber hinaus kann es hilfreich sein, sich mit einem theoretisch physikalisch optimalen MFO zu vergleichen, um weitere mögliche Effizienzpotenziale zu identifizieren oder Maßnahmen aus der

Literatur nachzuvollziehen. Mithilfe des PhO können die Grenzen der Verbesserungsbemühungen aufgezeigt werden.

Neben der statischen Effizienzbewertung bietet die Methode des PhO optionale Erweiterungen wie die dynamische Bewertung mittels der momentanen Effizienz. Diese hat sich für Induktionsöfen gegenüber konventionellen Bewertungsmethoden als vorteilhaft erwiesen, da Mehrverbräuche gegenüber dem PhO in erster Linie durch eine suboptimale Fahr- und Betriebsweise entstehen. Der PhO-Leistungsfaktor wird als Verhältnis aus zugeführter Leistung zur vom Schmelzgut aufgenommenen Leistung über der Zeit dargestellt. Anhand dieser dynamischen Bewertungsmethode können neben dem PhO-Leistungsfaktor verschiedene Parameter wie die zugeführte Leistung und die Schmelzgutmasse im zeitlichen Verlauf dargestellt werden. Der Vergleich der Abläufe einer Bestandsanlage mit dem technischen Optimum kann zudem Aufschlüsse über das technische Verbesserungspotenzial hinsichtlich der Fahr- und Betriebsweise geben.

Die Kenntnis über das PhO und den theoretischen Grenzwert ist im Rahmen einer Effizienzbewertung dringend erforderlich, um die Energie- oder Klimaziele sinnvoll zu formulieren. So kann frühzeitig die Notwendigkeit zusätzlicher Maßnahmen für eine umweltfreundlichere Produktion ermittelt werden. Hier kommt es insbesondere darauf an, das optimale Zusammenspiel des Ofens mit den übrigen Prozessschritten im Auge zu behalten, da Ineffizienzen häufig an den Schnittstellen der verschiedenen Prozesse auftreten. Hierbei spielt unter anderem die Abwärmenutzung eine wichtige Rolle. Außerdem sollte eine Umstellung auf erneuerbare Energien in Betracht gezogen werden, was laut einer Studie des Umweltbundesamtes in den meisten Gießereien zu 98 % möglich sei [13].

Weitere Informationen:

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER)
 Universität Stuttgart
 Heßbrühlstraße 49a
 70565 Stuttgart
Prof. Dr.-Ing. Peter Radgen
 Tel.: +49 711 685 87814
 E-Mail: paula.wenzel@ier.uni-stuttgart.de
 Web: www.ier.uni-stuttgart.de

Literatur:

[1] Svehla, J.; Krutzler, T.; Schindler, I.: *Stand der Technik der österreichischen Gießereien: Gesetzliche Rahmenbedingungen, technische Möglichkeiten und Gießereibetriebe in Österreich*. 2. Auflage. Wien, 2012.
 [2] Volta, D.: *Das Physikalische Optimum als Basis von Systematiken zur Steigerung der Energie- und Stoffeffizienz von Produktionsprozessen*. Dissertation, TU Clausthal, Clausthal, 2014.
 [3] Dötsch, E.: *Induktives Schmelzen und Warmhalten: Grundlagen, Anlagenaufbau, Verfahrenstechnik*. 3. Auflage. Essen: Vulkan Verlag, 2019.
 [4] Hack, K.: *Stoffwerte von Metallen und Berechnung von Wärmebilanzen*. In Starck, A.; Mühlbauer, A.; Kramer, C.: *Praxishandbuch Thermoprozess-Technik*. 1. Auflage. Essen: Vulkan-Verl., 2003.
 [5] Wenzel, P.: *Exergetische Analyse und physikalisches Optimum zur Bewertung und Steigerung der Ressourceneffizienz am Beispiel eines Mittelfrequenzofens*. Masterarbeit, IER, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2019.
 [6] Keichel, C.: *Methode der grenzwertorientierten Bewertung*. Dissertation, TU Clausthal. Clausthal, 2017.
 [7] *An Energystar: Guide for Energy & Plant Managers*. Nummer 430-R-16-001, 2016.
 [8] Trauzeddel, D.: *Spezielle Anwendungen der induktiven Schmelz- und Gießtechnik: Einsatzgebiete - Anlagenbau - Prozesstechnik*. 1. Auflage. Essen: Vulkan Verlag, 2018.
 [9] *Giesserei 95 (2008)*, [Nr. 6] S. 24 - 31.
 [10] *Giesserei 98 (2011)*, [Nr. 6], S. 158-170.
 [11] *Energy Efficiency Enquiries Bureau (EESU): Efficient melting in coreless induction furnaces*. In *Good Practice Guide 50*, 2000.
 [12] *Europäische Kommission: Reference Document on Best Available Techniques in the Smitheries and Foundries Industry. Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC)*, 2005.
 [13] Bosse, M.; Frost, E.; Hazrat, M.; Rhiemeier, J.-M.; Wolff, H.: *Ermittlung von branchenspezifischen Potentialen zum Einsatz von erneuerbaren Energien in besonders energieintensiven Industriesektoren am Beispiel der Gießerei-Industrie*. IfG Institut für Gießereitechnik gGmbH. Im Auftrag des Umweltbundesamts, Düsseldorf UBA-FB 00, 2013.