



THERMISCH-EFFIZIENTE TIEGEL- TECHNOLOGIE: GRUNDLAGEN, MODELLBILDUNG UND ANWENDUNGEN FÜR ENERGIEEINSPARUNGEN

Autoren: Brian Pinto & Wenwu Shi, Foseco NAFTA

Um Tiegel zu simulieren, die in Aluminiumgießereien verwendet werden, wurden auf Basis von detaillierten Materialdaten multivariate mathematische Modelle erstellt. Ziel war es, die Auswirkungen von Änderungen der Tiegelgeometrie und der Werkstoffeigenschaften auf die Gesamtenergieeffizienz des Ofens beim Schmelzen und Warmhalten von Metall zu untersuchen. Außerdem wurden die Auswirkungen der wichtigsten thermischen Eigenschaften untersucht, um ihren Einfluss auf die Energieeffizienz und die thermischen Spannungen zu verstehen, was einen weiteren wichtigen Faktor für das Verständnis des Tiegelverhaltens darstellt. Probleme bei der Bewertung dieser Veränderungen in der Gießereipraxis ergeben sich aus der Schwierigkeit, äußere Faktoren, die sich ebenfalls auf die Ofenleistung auswirken, wie z.B. individuelle Konfigurationen, Ofenzustand und in einigen Fällen schlechte Betriebsbedingungen, herauszurechnen. Da das Schmelzen und Warmhalten von Metall in Tiegeln einen großen Teil des Energiebedarfs der Gießereiindustrie ausmacht, könnten die jüngsten Fortschritte bei den Tiegeltechnologien, die sich aus diesen Studien ergeben, die Kosteneffizienz und den CO₂-Fußabdruck in der gesamten Branche erheblich beeinflussen. In Fallstudien zu Anwendungen wie dem Schmelzen und Warmhalten von Aluminium konnten erhebliche Verbesserungen der Feldleistung beobachtet werden.

I EINLEITUNG

Die zum Schmelzen und Warmhalten von Metall verwendete Energie macht fast 40% der gesamten Energiekosten einer herkömmlichen Gießerei aus [1]. Die Gießereiindustrie ist bekannt für hohen Energiebedarf, geringe Energieeffizienz und hohe CO₂-Emissionen [2-4].

Im Durchschnitt liegt der Energieverbrauch einer Gießerei weit über dem, was nach theoretischen Berechnungen prognostiziert wird [5-7]. Dies ist auf Schwächen beim Zusammenspiel des Schmelzens und Gießens zurückzuführen; einige dieser Schwächen sind im Prozess selbst begründet, andere wieder sind abhängig von den verwendeten Anlagentypen und spezifischen Methoden. Es gibt Möglichkeiten, die Energieeffizienz eines Gießereibetriebs zu verbessern, die Umweltbelastung deutlich zu reduzieren und gleichzeitig die Wettbewerbsfähigkeit der Branche zu erhalten [8-10]. Eine der gebräuchlichsten Methoden zum Schmelzen von Metallen ist ein elektrischer Widerstandsofen oder ein mit Brennstoff befeuerter Ofen [11,12]. In diesen Öfen wird geschmolzenes Metall in großen feuerfesten Tiegeln bei hohen Temperaturen warmgehalten. Zum Schmelzen wird die Energie, die

durch Widerstandselemente oder durch Brennstoffverbrennung an der Tiegelaußenwand erzeugt wird, auf die Metallcharge im Inneren geleitet und anschließend wird diese bei hohen Temperaturen geschmolzen [11,12]. Literaturstudien zeigen, dass empfohlene energiesparende Maßnahmen zur Optimierung der Ofenkonfiguration und/oder zur Verbesserung der Schmelzleistung [13-16] wenig oder gar keinem Fokus auf den Tiegel haben. Wenn Metall geschmolzen wird, verbraucht ein gut isolierter Ofen nur nominale Energie, um die Schmelze auf einer bestimmten Temperatur zu halten und Wärmeverluste an die Umgebung auszugleichen. Um zu diesem Punkt zu gelangen, ist jedoch eine enorme Menge an Wärmeenergie erforderlich, nicht nur, um das Metall auf seine Liquidustemperatur zu bringen und es zu schmelzen, sondern auch, um diese Wärme durch ein dickes, hochemissionsfähiges keramisches Material mit hoher spezifischer Wärmekapazität zu leiten, während es gleichzeitig den thermodynamischen Kräften entgegenwirkt, die den Wärmeabtransport in die Atmosphäre begünstigen. Der Tiegel ist eine physikalische Barriere zwischen der Wärmequelle und dem geschmolzenen Metall und spielt daher eine entscheidende Rolle bei der Bestimmung der Metallschmelzeffizienz. Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und Geometrie sind die Hauptfaktoren, sie sind feste Größen, die die Wärmeübertragung durch einen Tiegel bestimmen. Dies scheint geeignete Lösungen zur Verbesserung der Energieeffizienz des Ofens zu bieten. Betrachtet man jedoch die vielen Aspekte der Tiegel- und Ofenanwendung in der gesamten Industrie, wird die

Lösung des Problems schwieriger. Beim Schmelzen ist eine schnelle Wärmeleitung durch einen Tiegel sehr wünschenswert, während beim Halten eine langsame Wärmeleitung am besten ist. Wenn ein Tiegel sowohl für Schmelz- als auch für Warmhaltenanwendungen innerhalb desselben Ofens verwendet wird, wird die Herausforderung, einen universell effizienten Tiegel zu schaffen, deutlicher. Um diese Komplexität noch zu erhöhen, sind die Methoden der Kunden in der gesamten Branche so unterschiedlich, dass selbst die Abstimmung der Effizienz eines Ofens mit dem eigenen Tiegel äußerst schwierig wird. Wenn beispielsweise ein Ofen eine schlechte Isolierung aufweist, wird der Effekt des Wechsels zu einem hocheffizienten Tiegel durch die grobe Ineffizienz des Ofens zunichte gemacht. Dies wurde in vielen Feldversuchen beobachtet. Obwohl die Gesetze der Thermodynamik eine verbesserte Leistung voraussagen, stellt sich das in der Praxis nicht so dar, was es sehr schwierig macht, dem Kunden einen energiesparenden Tiegel vorzuführen. Daher ist es besser, die Auswirkungen eines Tiegels auf seine thermische Wirkung in einem standardisierten Umfeld zu untersuchen und nachzuweisen. In der Praxis ist dies nicht möglich, wohl aber mit theoretischen Modellen auf Basis von Finite-Elemente-Analysemethoden. Diese Arbeit untersucht, wie Wärmeflussverhalten und Energieeffizienz allein auf der Grundlage von Änderungen der Eigenschaften des Tiegelmaterials und des Designs in 2D- und 3D-Computermodellen untersucht werden können, wobei der Rest des Systems konstant bleibt. Dabei werden die Vorteile fortschrittlicher Tiegeltechnologien deutlich.

VERSUCHSAUFBAU

Die Finite-Elemente-Analyse (FEA) wurde mit dem ABAQUS 6.11 Paket für Wärmeübertragung und Temperaturverschiebung durchgeführt. Basierend auf dem Modell für einen typischen schüsselförmigen Tiegel (z.B. BU500), der mit 400 kg geschmolzenem Aluminium gefüllt ist, wurde ein zweidimensionales Wärmeflussmodell erstellt. Ein dreidimensionales Modell basierte auf einem 100-kW-Elektrowiderstands-

Tiegelofen, aus dem Temperatur- und Energieverbrauchsdaten abgeleitet wurden. Für die Simulation in den Computermodellen wurden mehrere Tiegeltypen betrachtet, darunter sowohl Kohlenstoff- als auch Keramik-(Ton)-gebundene Varianten. Wie bei jeder Computersimulation wurden für die Entwicklung des realistischsten Modells zuverlässige "reale" Daten benötigt, um die zu prüfenden Materialien zu beschreiben. Mit Hilfe von Proben wurden unterschiedliche Eigenschaften bestimmt wie Schütt-

dichte, Porosität, relative Dichte, Bruchmodul (MOR), Elastizitätsmodul (Young's), Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität (Tabelle I). Die aus Kundenversuchen gewonnenen Energiedaten wurden mit einem kundenspezifischen Energieüberwachungsgerät (FCTM-2, Foseco) erfasst, das gleichzeitig den Energieverbrauch und den Schmelzedurchsatz am Ofen überwachen kann.

Property	Units	Temperature (°C)	Ref. ASTM standard
Bulk Density	g/cm ³	25	C830-00
Apparent Porosity	%	25	C830-00
Apparent Specific Gravity	-	25	C830-00
Modulus of Rupture	MPa	25; 800; 1200	C78-02
Elastic Modulus	GPa	25 - 1600	E1875-13
Thermal Conductivity	W/m·K	200 - 1000	E1461-13
Specific Heat Capacity	J/kg·K	200 - 1000	E1461-13

Tabelle I. Liste der Materialeigenschaften für die thermomechanische Modellierung von Tiegel.

ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Ein zweidimensionales achsensymmetrisches Modell wurde speziell für die Untersuchung der Auswirkungen von Änderungen an Tiegel (d.h. Geometrie; feuerfeste Eigenschaften) auf den Wärmefluss und die Schmelzleistung von Aluminium konstruiert. Das Modell geht davon aus, dass ein kontinuierlicher, gleichmäßiger Wärmestrom auf die Außenseite eines Tiegels aufgebracht wird (Abbildung 1). Das Modell geht außerdem davon aus, dass der Tiegel teilweise mit Aluminium gefüllt ist, was die Einbeziehung der Strahlungswärmeübertragung von einer Schmelzbadoberfläche und der oberen Innenwand des Tiegels ermöglicht. Abbildung 1B zeigt die Temperaturkonturen bei

3970s und 5470s der Simulation, die die Temperaturgradienten innerhalb des Aluminiums und des Tiegels zeigen. Ohne Metall am oberen Wandbereich des Tiegels, um die Wärme aufzunehmen, kann es zu einer Überhitzung kommen; die Wärme kann nur durch Strahlung oder Abwärtsleitung durch die Wand abgeführt werden. Diese Situation kann zu Temperaturschockrisen führen. Glücklicherweise ist das Modell etwas vereinfachend, indem es von einem gleichmäßigen Wärmefluss ausgeht; in einem echten Ofen sind die Heizelemente typischerweise kürzer als der Tiegel hoch, was zu einer geringeren Erwärmung der oberen Wand führt.

Dadurch werden zwar Überhitzungsprobleme gemildert, aber es entsteht tendenziell das Gegenteil - eine lokale Unterhitzung, die ohnehin zu schlechtem Glasurschutz,

Oxidation und eventuellen Thermochockrisen führt. Die beste Vorgehensweise ist es, den Ofen so zu betreiben, dass bei diesen beiden Phänomenen ein Gleichgewicht erreicht wird: Die Füllstände sollten so hoch wie möglich sein, um steile Temperaturgradienten entlang der Tiegelwand zu vermeiden. Mittig auf der Unterseite des Tiegels (Abbildung 1B) befindet sich seine niedrigste relative Temperatur, da er sich hier am langsamsten erwärmt. Innerhalb des Aluminiums befindet sich die niedrigste Temperaturposition in der oberen Mitte (Abbildung 1B) aufgrund des Abstands zu den Elementen in Verbindung mit dem Wärmeverlust der Oberflächenstrahlung. Da die Wärmeleitfähigkeit von Aluminium jedoch viel höher ist als bei feuerfesten Materialien, ist der Temperaturgradient im Metall viel geringer als innerhalb der Tiegelwände.

Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse einer Heizsimulation, die sich auf den Punkt der niedrigsten Aluminiumtemperatur ("x" in Abbildung 1B) konzentriert, geplottet über die Zeit. Wie in Abbildung 2A dargestellt, hat jede Kurve drei verschiedene Bereiche: Die Temperaturen steigen im ersten Bereich (I) aufgrund der schnellen Wärmeleitung durch massives Aluminium sehr schnell an. Bei Erreichen der Solidustemperatur (557°C) nimmt die Steigung aufgrund der für die Fusion aufgenommenen latenten Wärme ($H_f = 398 \text{ kJ/kg}$) deutlich ab und definiert den zweiten Bereich (II). Bei Überschreitung des Liquidus (613°C) beginnt die Temperatur wieder schnell zu steigen (III). Abbildung 2A zeigt auch sieben verschiedene Diagramme, von denen jedes die gleiche Simulation darstellt, aber mit unterschiedlichem Tiegelmateriale (A - F), als Referenz dient reines Graphit (G). Dies ermöglicht es, die Zeit vorherzusagen, die benötigt wird, um eine bestimmte Aluminiummenge in Abhängigkeit von der Tiegelmateriale vollständig zu schmelzen (Abbildung 2B). Die Prozesszeit reichte von 193 min bis 234 min für feuerfeste Massen (best to worse) und 154 min für Reingraphit. Die Verwendung von reinem Graphit im Modell dient ausschließlich als theoretische Obergrenze für die graphithaltigen feuerfesten Zusammensetzungen (A-F). Der Grund für die Unterschiede in den Schmelzzeiten des feuerfesten Materials liegt in mehreren wichtigen Eigenschaften, die durch eine geeignete Entwicklung auf die Herstellung eines thermisch effizienteren Materials zugeschnitten werden können. Die beiden wichtigsten Eigenschaften sind in diesem Fall die Wärmeleitfähigkeit (k) und die spezifische Wärmekapazität (C). Eine hohe Wärmeleitfähigkeit bedeutet, dass die Wärmeübertragung durch ein Material schneller

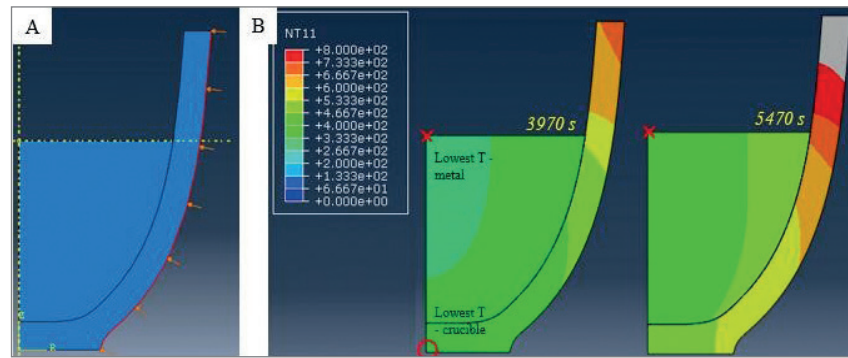


Abbildung 1. (A) Zweidimensionales Tiegelmodell, das den auf die Außenfläche aufgetragenen Wärmestrom zeigt. (B) Temperaturprofile von Tiegel und Metallschmelze in verschiedenen Zeitabständen mit energieeffizientem Gemisch (3970s und 5470s).

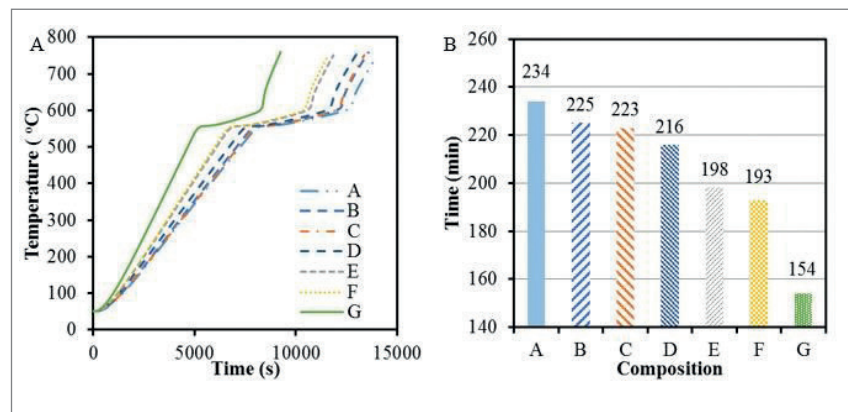


Abbildung 2. (A) Temperaturprofile des kältesten Punktes im Inneren (siehe Abbildung 1) des Tiegels mit unterschiedlichen Zusammensetzungen. Die Latentwärme wurde auf 389 kJ/kg eingestellt. Die Solidustemperatur beträgt 557°C und die Liquidustemperatur 613°C. (B) Geschätzte Zeit für die Erwärmung des geschmolzenen Metalls auf 750°C.

ist als durch ein Material mit einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit. Umgekehrt benötigt ein Material mit hoher spezifischer Wärmekapazität mehr absorbierte Energie, um seine Temperatur zu erhöhen, als ein Material mit niedriger spezifischer Wärmekapazität. Tabelle II listet die Wärmeleitfähigkeit und die spezifischen Wärmekapazitäten für verschiedene Tiegelmateriale auf.

Bei Material A ist die Wärmeleitfähigkeit niedrig und die spezifische Wärmekapazität hoch, was zu der längsten Schmelzzeit des Aluminiums und damit zu den höchsten Energiekosten führt. Material B hat die höchste Gesamtwärmeleitfähigkeit, hat aber auch eine sehr hohe spezifische Wärmekapazität; daher war die

Schmelzzeit nur neun Minuten kürzer als die von Material A. Durch F&E-Arbeiten zur Optimierung dieser Eigenschaften und zur Maximierung der Effizienz wurden die Schmelzzeiten für die Materialien C, D und E reduziert. Schließlich wurde Material F entwickelt, ein Material mit hoher Wärmeleitfähigkeit bei gleichzeitig niedriger spezifischer Wärmekapazität. Wurden diese Eigenschaften in das thermische Modell eingegeben, prognostizierten sie eine Verbesserung der Heizeffizienz um 19,2%, eine Reduzierung der Schmelzzeit um 41 Minuten und eine Energiekosteneinsparung von 8,02 \$ pro Tonne.

Neben den Materialeigenschaften können geometrische Merkmale eines Tiegels, insbesondere Form und Größe, einen großen Einfluss auf die Energieeffizienz haben. Abbildung 3 vergleicht Simulationen von zwei verschiedenen Tiegelkonfigurationen. Abbildung 3A zeigt einen relativ kleinen Tiegel mit einer Kapazität von 181 kg, Abbildung 3B zeigt einen viel größeren Tiegel, der 816 kg Aluminium aufnehmen kann. Durch die Änderung der Tiegelgeometrie und die erneute Durchführung von 2D-Schmelzzeitimulationen wird deutlich, dass die Vergrößerung der Tiegelgröße einen wesentlichen Einfluss hat. Wie bereits erwähnt, führt allein der Wechsel zu einem effizienteren Tiegelmateriale (von E nach F) zu einer Senkung der Netto-Energiekosten.

Bei Anwendung auf den kleinen 181 kg-Tiegel liegt die Verbesserung bei bescheidenen 2,4% pro MT. Durch die Substitution des Materials und die Erhöhung der

Tiegelgröße auf das 4-fache der Kapazität sinken die Energiekosten pro MT geschmolzenem Aluminium jedoch deutlich von 8,02 \$ auf 3,23 \$, was einer Reduzierung von 61% entspricht. Denn das Massenverhältnis von Tiegel zu Aluminium ändert sich deutlich, so dass mehr Gesamtenergie zum Schmelzen des Aluminiums verbraucht wird als zum Erwärmen des Tiegels. Die absoluten Massen von Feuerfest- und Metallwerkstoffen sind im größeren Tiegel höher. Daher erhöht sich die Gesamtzeit zum Schmelzen auf 351 Minuten, aber die Gesamtschmelzleistung wird von 0,91 kg/min auf 2,32 kg/min erhöht, was einer Steigerung von 154% entspricht. Das Schmelzen der äquivalenten Masse im kleineren Tiegel würde mindestens das 2,5-fache der Zeit in Anspruch nehmen, ohne Nachladen und Schmelztransferzeit. Es ist wahr, dass ein kleinerer Tiegel eine geringere Menge an Aluminium schneller schmelzen kann, so dass

je nach Durchsatz einer Gießerei ein kleinerer Tiegel vorteilhaft sein kann, um Energieverluste zu vermeiden (einen großen Tiegel schmelzen lassen, bis das überschüssige Metall vollständig verbraucht ist). Um große Mengen Aluminium zu schmelzen, ist ein großer Tiegel auf Kosten-per-kg-Basis energieeffizienter, aber es dauert länger, jedoch ist auch Zeit mit Kosten verbunden.

Wie bei den meisten Bemühungen zur Verbesserung von Eigenschaften gibt es Einschränkungen und Kompromisse. Da Tiegel einem weiten Temperaturbereich ausgesetzt sind und die Änderungsrate (T) stark variieren kann, entstehen beim Gebrauch zwangsläufig thermische Spannungen im Material. Rissbruch und/oder verminderte Lebensdauer sind beides Auswirkungen von thermischen Spannungen, da feuerfeste Materialien eine begrenzte Duktilität aufweisen. Auf der Suche nach einem verbesserten thermischen Wirkungsgrad durch Materialänder-

Material	Thermal Conductivity (W/m·K)		Specific Heat Capacity (J/kg·K)		Time to Melt (min)	Total Energy Use (kWh)	Cost (\$/MT)
	at 200°C	at 600°C	at 200°C	at 600°C			
A	7.42	6.69	1200	1892	234	103.5	9.72
B	57.03	42.05	1169	1553	225	99.5	9.34
C	29.33	22.45	1330	1790	223	98.6	9.27
D	31.73	20.86	840	1384	216	95.5	8.97
E	27.92	23.41	891	1316	198	87.5	8.22
F (ENERTEK)	43.06	35.82	825	1133	193	85.3	8.02
Graphite	175	171	710	710	154	68.1	6.39

Tabelle II. Physikalische Eigenschaften verschiedener Tiegelzusammensetzungen mit prognostizierten Gesamtschmelzzeiten, Energieverbrauch und damit verbundenen Kosten.

Material	Crucible Capacity (kg)	Thermal Conductivity (W/m·K)		Time to Melt (min)	Melting Rate (kg/min)	Cost (\$/MT)
		at 200°C	at 600°C			
E	181	27.9	23.4	198	0.91	8.22
F (ENERTEK)	181	43.1	35.8	193	0.94	8.02
F (ENERTEK)	816	43.1	35.8	351	2.32	3.23

Tabelle III. Vergleich von Schmelzzeit und Energiekosten für Tiegel mit unterschiedlichen Kapazitäten.

ungen könnte die Intensität der Eigenspannungen unwissentlich erhöht werden, so dass der Tiegel die Anwendung einfach nicht übersteht. Glücklicherweise erlaubt eine weitere nützliche Funktion der Modellierungssoftware die Simulation von thermischen Spannungen in Abhängigkeit von Materialeigenschaften, Tiegelgeometrie und Temperatur. Neben den bereits in das Modell eingegebenen gemessenen mechanischen und physikalischen Eigenschaftsdaten wurden mit einem Datenlogger auch Temperaturprofile aus realen Heizzyklen verschiedener Tiegel erfasst. Mit diesen zusätzlichen Informationen konnten thermische Spannungszustände mit dem Temperatur-Verdrängungsmodell in ABAQUS vorhergesagt werden.

Abbildung 3 zeigt ein Beispiel der durch das Computermodell gewonnenen Informationen. Ein Tiegel aus einem herkömmlichen Feuerfestmaterial (Material E) erfährt beim Erhitzen eine maximale thermische Belastung von 15 MPa.

Durch den Wechsel des Tiegels zu einer thermisch effizienten Zusammensetzung (Material F) wird die maximale thermische Belastung deutlich auf 8,8 MPa reduziert. In dieser Situation haben die Bemühungen zur Verbesserung des thermischen Wirkungsgrades auch die thermische Belastung verringert, aber das ist nicht immer der Fall. Um diesen Punkt zu veranschaulichen, betrachten Sie die frühere Behauptung, dass die Verwendung eines größeren Tiegels besser ist, da der thermische Wirkungsgrad viel höher ist. Das ist zwar korrekt, aber mit zunehmendem Tiegeldurchmesser steigt auch der Abstand zwischen der niedrigsten Temperaturposition im Tiegelboden (Abbildung 1B) und den Heizelementen. Dieser längere Leitungsweg durch den

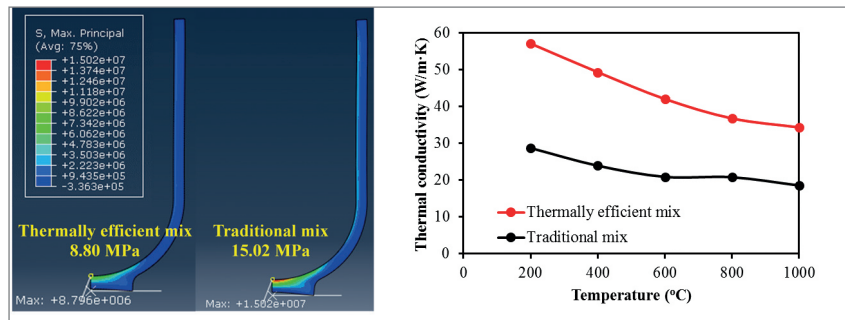


Abbildung 3. (A) Vergleiche der thermischen Belastung für große Tiegel mit traditionellen und thermisch effizienten Mischungen. (B) Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten für zwei verschiedene Tiegelmaterialien.

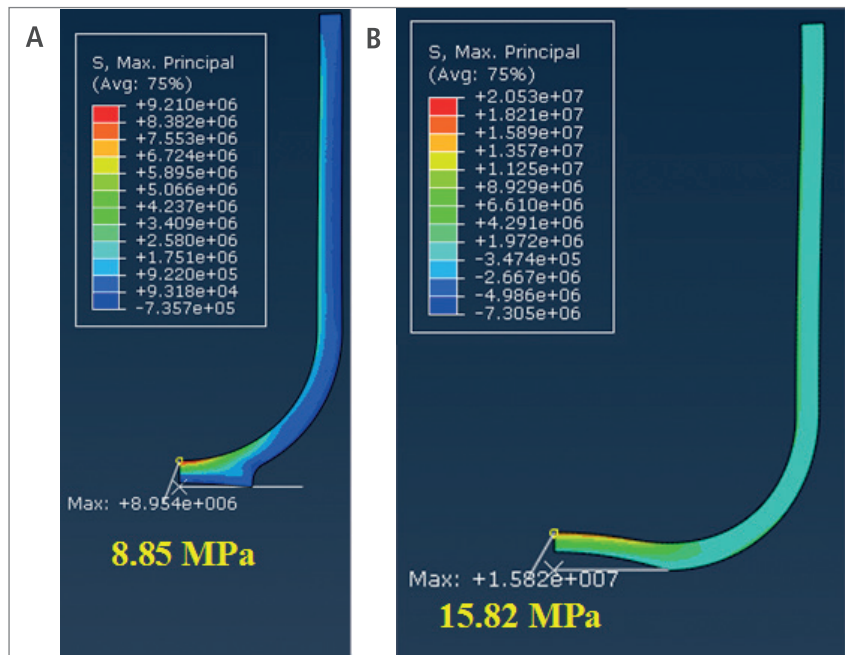


Abbildung 4. Voraussichtliche maximale thermische Belastung in Tiegeln mit unterschiedlichen Abmessungen. (A) 615 mm Durchmesser und 900 mm Höhe und (B) 1055 mm Durchmesser und 1100 mm Höhe. Die Verformungsskala ist 100.

Tiegel führt zu einem größeren Temperaturgradienten in der Tiegelfwand, der höhere thermische Spannungen erzeugt. Wie in Abbildung 4 dargestellt, weist ein 1055mm-Durchmesser-Tiegel eine wesentlich höhere thermische Belastung (15,8 MPa) auf als ein Tiegel mit 655mm Durchmesser (8,9 MPa). Die hohe Spannung nähert sich der Festigkeit des Tiegelfeuerfestmaterials selbst. Um in dieser Situation einen hohen thermischen Wirkungsgrad großer Tiegel zu erreichen, ohne die Spannungen im Materialdesign zu überschreiten, ist es notwendig, wärmeeffiziente Zusammensetzungen

zu verwenden, bei denen eine hohe Wärmeleitfähigkeit dazu beiträgt, Temperaturgradienten und damit thermische Spannungen zu reduzieren.

Die zweidimensionale Modellierung ermöglicht die schnelle Berechnung der Energieeffizienz und die Untersuchung verschiedener Effekte der Zusammensetzung; sie ist jedoch eine zu starke Vereinfachung eines wesentlich komplizierteren Systems, bei der mehrere wichtige Merkmale und Verhaltensweisen eines tatsächlichen Tiegelfofens vernachlässigt werden.

Die Konfiguration und Position der Elektroofen-Heizelemente ist im 2D-Modell nicht genau definiert - ein konstanter Oberflächenwärmestrom ist nicht sehr realistisch. Diese Art von Genauigkeit ist sehr schwierig zu erreichen, da die meisten Tiegelöfen um einen Temperatursollwert herum arbeiten, der einem Thermostat ähnelt. Somit ist der Wärmestrom, der von der Tiegelaußenseite kommt, zyklischer, wobei hohe und niedrige Temperaturen den Sollwert begrenzen (Abbildung 5). Darüber hinaus ist die Wärmequelle kein Kontinuum, das um den Tiegel herum existiert, sondern eher Elementblöcke in verschiedener Größe und Lage im Ofen. Um dieses besser zu simulieren, wurde ein verbessertes dreidimensionales Modell konstruiert, basierend auf einem typischen elektrischen Widerstandsofen.

Abbildung 6A zeigt zwölf (12) Heizplatten, die um einen Tiegel herum verteilt sind. Abbildung 7B zeigt die für die 3D-Modellierung verwendeten Netze. Da die Symmetrie im Ofen noch vorhanden ist, wurde ein 30-Grad-Segment modelliert, wobei die Abmessungen auf einen tatsächlichen Ofen skaliert wurden, unter Berücksichtigung von Tiegel, Aluminium, Heizelementen und Isolierung. Wie bereits erwähnt, ist der Wärmestrom von den Elementen nicht konstant. Abbildung 6C (schwarze Linie) zeigt die tatsächliche Leistungsaufnahme des Ofens, gemessen mit einem Datenlogger. Unter Berücksichtigung des Leistungsfaktors wurde die Eingabe in das Modell berechnet (rote Linie), um den tatsächlichen Fall genau zu simulieren.

Die Energie wurde als Wärmeströmung in 11 Reihen von Rohrelementen eingebracht. Sechs verschiedene Wärmeübertragungsszenarien wurden für das Modell berücksichtigt:

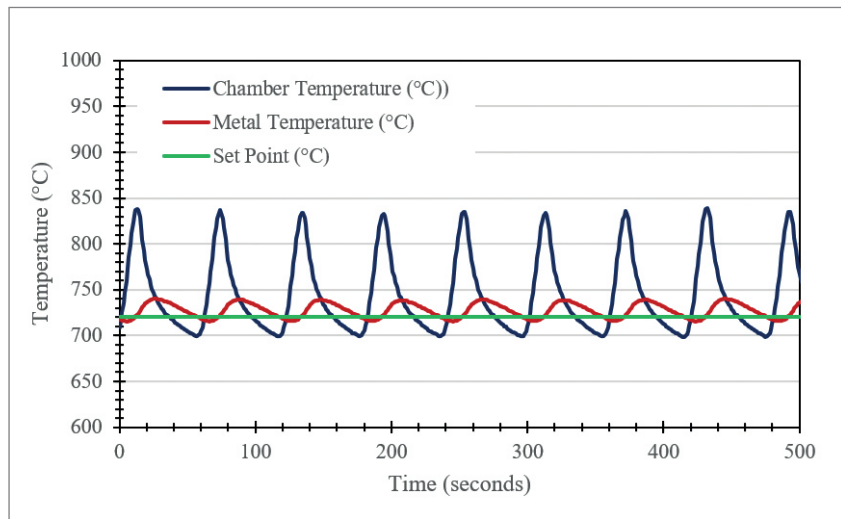


Abbildung 5. Temperatur- und Zeitdiagramme an einem 100-kW elektrischen Widerstandstiegelofen, die die zyklische Art des Erwärmens und Kühlens zeigen (Metall und Kammer versus fester Sollwert = 720°C).

1. Wärmeströmung, der in Heizelemente eingeleitet wird und in Strahlung umgewandelt wird.
2. Strahlungswärme von Heizelementen, die auf die Tiegelaußenseite ragen.
3. Wärmeübertragung zwischen Heizelementen und Blockisolierung.
4. Wärmeübertragung zwischen Tiegel und Aluminium.
5. Strahlungswärmeübertragung zwischen Isolierung und Außenseite des Tiegels.
6. Strahlungswärmeverluste von der Schmelzoberfläche und der Oberseite des Tiegels.

Die Abbildungen 7A und 7B zeigen Visualisierungen des Modells mit Farben, die die Komponententemperaturen (rot >> blau) bei 1 Stunde bzw. 2 Stunden darstellen. In dieser Zeit erreichen die Heizelemente sehr hohe Temperaturen, insbesondere nach unten und an den Elementkanten. Denn in diesen Bereichen ist ihr Abstand zum Tiegel größer, was die Strahlungswärmeübertragungsraten reduziert.

Wie beim zweidimensionalen Modell befindet sich ein temperaturabhängiges Minimum im unteren Zentrum des Tiegels, wobei die Differenz bis zu 300°C betragen kann. Die Abbildungen 7C, 7D und 7E zeigen ähnliche Temperaturkonturen, während das Aluminium (kälteste Stelle) bei 500°C, 600°C und 700°C liegt. Anstatt die mit dem 2D-Modell durchgeführten Studien zu wiederholen, wurde beschlossen, das 3D-Modell zu verwenden, um andere Aspekte der Tiegelgeometrie in Bezug auf die Schmelzzeit zu untersuchen. Die Tiegel wurden nach Entwürfen aus hocheffizientem feuerfestem Material (Material F) modelliert. Anschließend wurden auf Grundlage der geometrischen Designänderungen deren Energieverbrauch und theoretischer Wirkungsgrad berechnet und verglichen. Erstes Ergebnis war eine Standardtiegelkonstruktion, die nachfolgenden Modelle waren zwar von ähnlicher Form, hatten aber immer dünnere Wandquerschnitte (größere ID). Abbildung 8 zeigt die Darstellung der niedrigsten Temperaturposition in der Schmelze (Kreis in Abbildung 7) für beide Tiegel in Abhängigkeit von der Zeit.

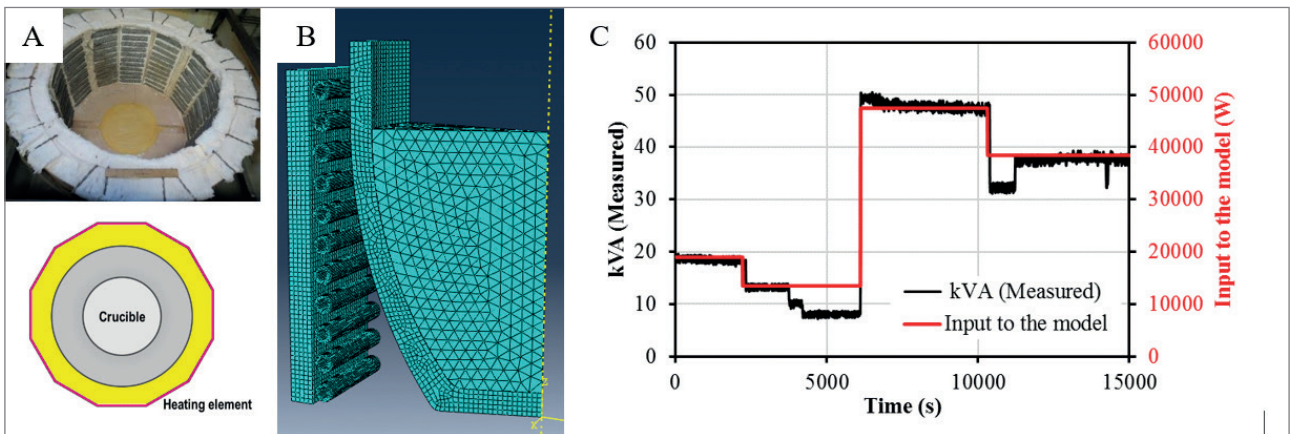


Abbildung 6. (A) Das Foto zeigt die Verteilung von 12 Elementen (Dodecagon). (B) Netzmodelle von Isolierplatte, Heizelementen, Tiegel und Aluminiumschmelze (30°-Modell mit 39723 Knoten und 35122 Elementen). (C) Energieverbrauch für einen typischen Schmelzyklus und geschätzter Input für das Finite-Elemente-Modell, gemessen mit einem Energiezähler (kVA).

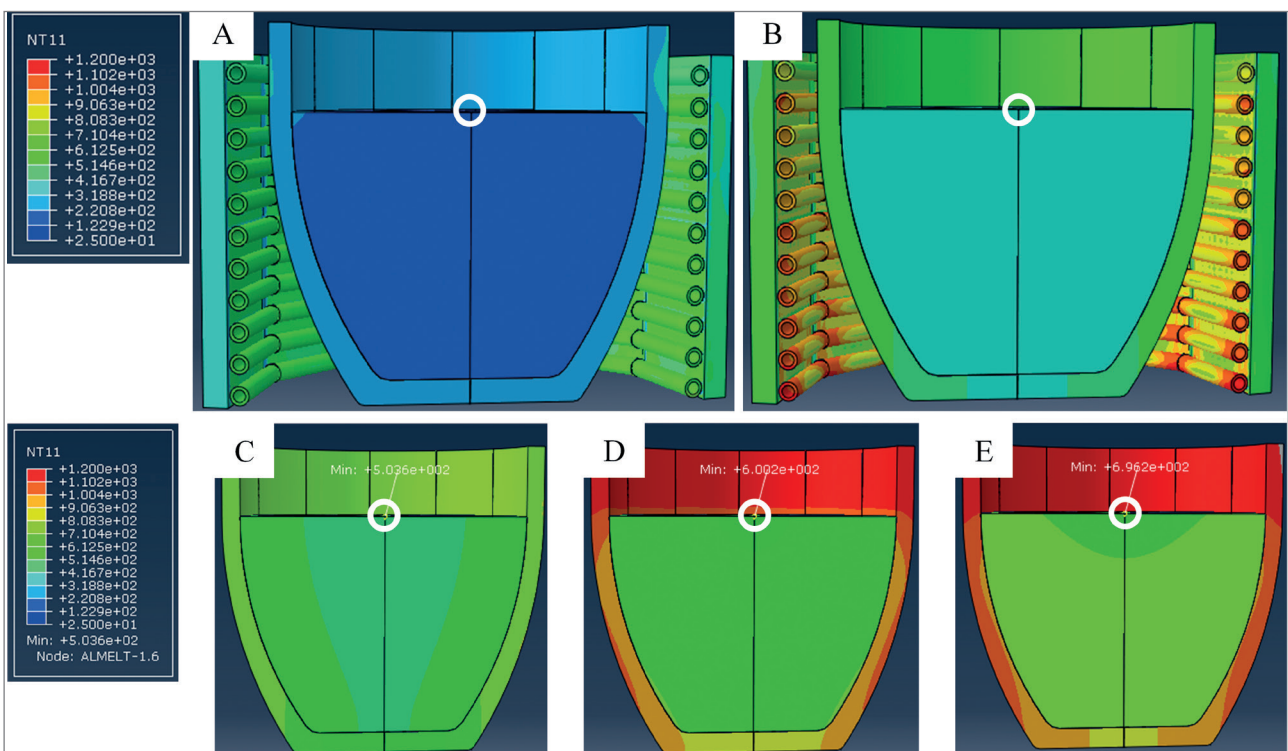


Abbildung 7. Simulierte Temperaturprofile in einem elektrischen Widerstandsofen nach (A) 1 Stunde und (B) nach 2 Stunden. Temperatur des isolierten Tiegels und Aluminiums, wenn die Knotentemperatur (Kreis) (C) 500°C, (D) 600°C und (E) 700°C beträgt.

Abbildung 8B listet die vorhergesagten Eigenschaften beider Tiegel auf; "Effizienz" ist das Verhältnis der Energie, die zum Erwärmen und Schmelzen des Metalls verwendet wird, zur gesamten aufgewendeten Energie (x 100%).

Dieser Versuch zeigt, dass die Änderung der Tiegeldimensionen einen bedeutenden Einfluss auf die Reduzierung der Masse des Tiegels

hat, während die Kapazität des Aluminiums (capacity) zunimmt. Obwohl sich die Schmelzzeit kaum ändert, reduziert sich der Gesamtenergieverbrauch pro kg Aluminium. Für dieses System wird die maximale Schmelzleistung um 15% von 1,25 auf 1,44 kg/min erhöht. Bei gleichem Energieaufwand des Ofens wird mehr davon auf das Metall gerichtet, da die geringere feuerfeste Masse es absorbiert. Dadurch steigt

der Wirkungsgrad von 65,8% auf 72,4%. Langfristig kann dies zu erheblichen Einsparungen führen. Es ist zu beachten, dass bei der gleichen Simulation mit Daten aus einem herkömmlichen Tiegelmaterial ein ähnlicher Trend zu beobachten wäre, wenn auch in geringerem Maße ohne das höher effiziente Tiegelmaterial.

Aus diesen Simulationen geht hervor, dass durch die Verwendung eines thermisch effizienten Tiegelmaterials in Verbindung mit einem Design mit geringerer Masse und größerer Kapazität, das Schmelzen von Aluminium energiebewusster gestaltet werden kann. Der nächste logische Schritt war die Validierung der Simulationsergebnisse. Für einen speziellen Versuch wurde ein Tiegel aus der Feuerfestzusammensetzung F, mit reduzierter Masse und erhöhter Kapazität in einer US-Gießerei hergestellt. Die Anwendung erfolgte im manuellen Sandguss aus zwei nahezu identischen elektrischen Widerstandsöfen. Beide Öfen wurden gefüllt, aber es wurde nur einer nach dem anderen verwendet. Es wurde also immer ein Ofen gehalten, während der andere zum Gießen verwendet wurde. Was dies zu einem besonders guten Ort für die Versuche machte, war, dass beide Öfen von den

gleichen Betreibern für den gleichen Betrieb genutzt wurden, das bot die besten Chancen, unkontrollierte Variablen in einem industriellen Umfeld zu minimieren. Zusätzlich wurden beide Öfen nur in einer Schicht (8 Stunden/Tag) betrieben und dann für den Rest der Zeit stillgelegt. Dies bot die Möglichkeit, den Energieverbrauch bei vielen verschiedenen Betriebsarten des Ofens zu erfassen.

Der Durchsatz des Ofens wurde mit einem kundenspezifischen Tiegel-Energie-/Durchsatzmonitor genau gemessen, der in der Lage ist, den Energieverbrauch ständig zu messen und die Menge des Metallgusses pro Tag zu verfolgen. Dies ermöglichte eine Normalisierung der Energieergebnisse auf die Menge des Aluminiumgusses. Basierend auf einem sechsmonatigen Experiment, bei dem ein Standard-

Wettbewerbstiegel mit einem energieeffizienten Tiegel verglichen wurde, lag die Energieeinsparung beim Gießen in der Größenordnung von 20% zugunsten des energieeffizienten Tiegels (764 kWh/MT vs. 605 kWh/MT). Gleichzeitig wurde der Gesamtenergieverbrauch um 14% reduziert (30,4 MWh auf 26,0 MWh). Ausgehend von dieser Studie wird geschätzt, dass für einen einzelnen Ofen im Dauerbetrieb das jährliche Energieeinsparpotenzial bis zu 26 MWh oder 2500 \$ an Stromersparnis pro Jahr betragen könnte (ca. 0,08 \$/kWh). Dies bedeutet auch eine Reduzierung der CO₂-Emissionen um 16.573 kg pro Ofen und Jahr. In einer Gießerei, die viele Öfen nutzt, könnten die Gesamteinsparungen recht hoch sein.

ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG

Mit herkömmlichen Bewertungsmethoden, unkontrollierten Feldversuchen oder einfachen Energievergleichen hat sich der Wechsel zu einem energieeffizienten Tiegel als sehr schwierig erwiesen. Fast immer werden die Vorteile durch andere praxisbezogene Variablen in der Gießerei verdeckt, die die Anlageneffizienz beeinträchtigen.

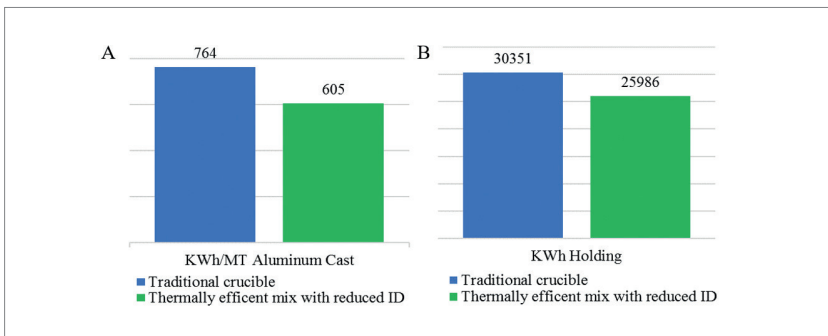
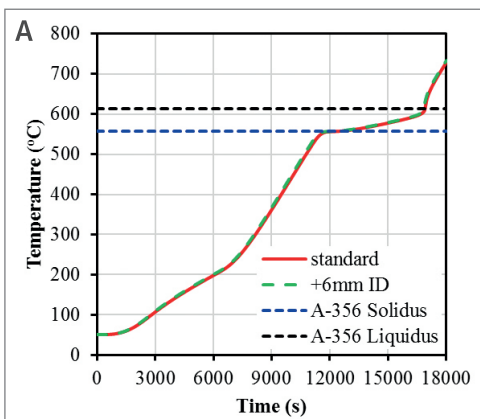


Abbildung 9. Energieverbrauch für zwei verschiedene Arten von Tiegeln, herkömmliche und thermisch-effiziente Mischung mit reduzierter ID, die für (A) einen Gießofen und (B) einen Warmhalteofen für eine 6-monatige Testphase verwendet wird.



B	ENERTEK mix			
	(43 mm)	(37 mm)	(31 mm)	(25 mm)
Crucible Mass (kg)	173	157	132	111
Al Mass (kg)	353	366	379	403
Melt Time (min)	282	280	279	279
Melt Rate (kg/min)	1.25	1.30	1.36	1.44
Energy Use (kJ/kg)	1461	1400	1341	1264
Efficiency (%)	65.8	68.7	71.6	72.4

Abbildung. 8 (A) Temperierte Profile für Standardtiegel und Tiegel mit erhöhter ID. (B) Vergleich des Tiegelgewichts, des Aluminiumgewichts und der Schmelzzeit, des Energieverbrauchs und des theoretischen Wirkungsgrades als Funktion der feuerfesten Wanddicke.

Die Gießerei sollte diese Probleme beseitigen oder verringern, oft ist es etwas so Einfaches wie der Austausch einer beschädigten Isolierung oder den Ofendeckel geschlossen zu halten - die Vorteile eines Energie-spartiegels würden deutlicher zum Tragen kommen. Mit der theoretischen Modellierung ist es möglich, diese Variablen aus der Gleichung zu eliminieren. Damit können Unterschiede in der Energieeffizienz abgeschätzt werden, die direkt durch Änderungen an der Tiegelgeometrie und -zusammensetzung beeinflusst werden. Außerdem können Erkenntnisse darüber gewonnen werden, bis zu welchen Grenzen diese Merkmale geändert werden können, um Energiesparinitiativen zu unterstützen. Es ist wichtig zu beachten, wie sich Änderungen der Zusammensetzung und/oder der Geometrie auf den Spannungszustand des Tiegels auswirken, insbesondere in Abhängigkeit von der Temperatur. Glücklicherweise können diese Bedingungen mit einer geringen Menge an Zusatzinformationen auch in einem Computermodell simuliert werden. Mit der Fähigkeit, die Eigenschaften und das thermische Verhalten von Tiegeln in einem noch relativ unerforschten Maße zu verstehen, wurden neue Materialien entwickelt, die nicht nur im theoretischen Bereich vielversprechend waren, sondern auch deutliche Verbesserungen zeigten, wenn sie auf einen tatsächlichen Tiegel in einem realen Gießereibetrieb unter genauer Überwachung angewendet wurden, bei dem die tatsächlich gesammelten Daten in der Lage waren, die Computermodelle zu validieren. Die Extrapolation dieser Leistung auf den gesamten Betrieb einer Gießerei könnte große Auswirkungen in Bezug auf erhöhte Energieeinsparungen, die Minimierung des CO₂-Ausstoßes und die Senkung der Gesamtbetriebskosten haben. Diese Konzepte werden von den

Gießereibesitzern und -managern ständig geprüft; mit Hilfe dieser und anderer Bewertungsinstrumente können sie beginnen zu verstehen, dass etwas so Bescheidenes wie ein Tiegel einen erheblichen Einfluss auf ihr Ergebnis haben kann.

LITERATUR

1. K. Salonitis, B. Zeng, H.A. Mehrabi, M. Jolly, *Procedia CIRP* 40, 24 (2016).
2. J.Y. Kwon, W. Choate, R. Naranjo. "Advanced Melting Technologies: Energy Saving Concepts and Opportunities for the Metal Casting Industry." US Department of Energy, Metal Casting Portfolio 7 (2005).
3. P.Rohdin, P.Thollander, P.Solding, *Energy Policy* 35, 672 (2007).
4. P. Thollander, S. Backlunk, A. Trianni, E. Cagno, *Appl. Energy* 111, 636 (2013).
5. Schifo, J. F., and J. T. Radia. "Theoretical/best practice energy use in metalcasting operations." US Department of Energy Industrial Technologies Program, Report (2004).
6. M.R. Jolly, K. Salonitis, F. Charnley, P. Ball, H. Mehrabi, E. Pagone. *Light Metals*, ed. A.P. Ratvik (New York, NY: Springer, 2017), p. 917.
7. T.E. Norgate, S. Jahanshahi, W. J. Rankin, *J. Cleaner Prod.* 15, 838 (2007).
8. R.M. Torielli, R.A. Abrahams, R.W. Smillie, R.C. Voigt, *China Foundry* 8, 74 (2011)
9. S. Dalquist, T. Gutowski, *Proceeding of IMECE.* 62599, (2004).
10. S. Fore, C. T. Mbohwa. *J. eng. design technol.* 8, 314 (2010).
11. Brown, John. *Foseco non-ferrous foundryman's handbook*, 11th ed. (Woburn, MA: Butterworth-Heinemann, 1999).
12. D.M. Stefanescu, *ASM Handbook Vol. 15 Casting*, (ASM International, 2008).
13. A.O. Nieckele, M.F. Naccache, M.S.P. Gomes. *Appl. Therm. Eng.* 31, 841 (2011).
14. R.T. Bui, R. Ouellet. *Metall. Mater. Trans. B* 21, 487 (1990).
15. Trinks, Willibald. *Industrial furnaces*. Vol. 1. (John Wiley & Sons, 2004).
16. K. Pericleous, V. Bojarevics, G. Djambazov, R.A. Harding, M. Wickins, *Appl. Math. Model.* 30, 1262 (2006).