

Schwachstellenanalyse und Prozessverbesserung in Nichteisen-Schmelz- und Druckgussbetrieben durch bidirektionale Kopplung eines Materialflussmodells mit einem Energiemodell

Weak Point Analysis and Process Improvement of Non-ferrous Melting and Die-casting Plants Using Bidirectional Coupling of a Material Flow Model with an Energy Model

Wolfgang Schlüter, Matthias Henninger, Andreas Buswell, Jörg Schmidt,
Hochschule Ansbach, Ansbach (Germany),
Wolfgang.Schlueter@hs-ansbach.de, Matthias.Henninger@hs-ansbach.de,
A.Buswell@hs-ansbach.de, Jo.Schmidt@hs-ansbach.de

Abstract: This paper outlines the use of bidirectionally coupled material flow and energy models for non-ferrous melting and die-casting industries. An interface-based communication between continuous and time-discrete processes is created by means of a hybrid simulation environment based on the simulation tools MATLAB, Simulink and Stateflow. This allows the examination of different logistical measures with extensive consequences on the supply chain. The simulation results are used to determine the effects on logistical key figures such as productivity and energy efficiency. These key figures are suitable to evaluate the benefit of the applied measures for the actual plant.

1 Einführung

Die Bedeutung der Energieeffizienz hat speziell in Deutschland infolge der Energiewende und der steigenden Konkurrenz durch die Globalisierung stark zugenommen. Das Energie- und Kosteneinsparungspotenzial ist dabei in energieintensiven Industriezweigen, wie z. B. der Nichteisen (NE)-Schmelz- und Druckgussindustrie besonders hoch. In dieser Branche liegt der Energieverbrauch pro Tonne gutem Guss in der Regel zwischen 2000 und 6000 kWh (Belt 2015; Bosse et al. 2013; Herrmann et al. 2013). Dies führt zu einer hohen Energiekostenbelastung, die laut dem statistischen Bundesamt 25 % der Bruttowertschöpfung übersteigen kann (Schimansky 2017). Bis zu 60 % der aufgebrauchten Energie entfallen auf den Aufschmelzvorgang des Aluminiums, der in der Regel in gasbefeuerten Sekundäraluminiumschmelzöfen der werksinternen Schmelzerei abläuft. Die Energieeffizienz der verwendeten Schmelzöfen ist stark

abhängig von deren Bauart, Alter, Auslastung und Betriebsweise (Belt 2015; Felder et al. 2014; LfU 2005; Salonitis et al. 2016).

Fundiertes Wissen zur energieeffizienten Steuerung von Produktionsabläufen mittels simulationsgestützter Verfahren existiert seit längerem. Als Beispiel hierfür kann die Arbeit von Junge (2007) genannt werden. Zur Umsetzung speziell in Gießereien existieren seit jüngster Vergangenheit ebenfalls Untersuchungen (Fuss et al. 2013; Fuss et al. 2014; Krause et al. 2012). Eine weitere Studie zur energieeffizienten Produktion von Aluminiumdruckguss (Herrmann et al. 2011) wurde im Forschungsprojekt ProGRes durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen Energieeffizienzpotenziale für die jeweiligen Betriebskomponenten. Die kleine Betriebsgröße (ein Schmelzofen, drei Aluminiumverbraucher) ermöglichte es jedoch nicht, Steuerungsstrategien für einen effizienten Schmelzofenbetrieb zu entwickeln.

Eine Herausforderung stellt in diesem Zusammenhang die Mischung aus ereignisdiskreten und kontinuierlichen Prozessen dar, die aus der gegenseitigen Beeinflussung von Produktions- und Logistikprozessen sowie der Berücksichtigung energetischer Einflussgrößen resultiert. In einer Studie von Peter und Wenzel wird für die Simulation von Produktionssystemen in der Automobilindustrie eine Kopplung aus den kommerziellen Programmen Plant Simulation (Materialfluss) und MATLAB/Simulink (Energiefluss) genutzt, um die bidirektionalen Wechselwirkungen zwischen Materialfluss und energetischen Größen abzubilden (Peter und Wenzel 2015). Eine auf energetischen Untersuchungen basierende Einbindung der vorgelagerten Schmelzöfen wurde dabei allerdings nicht vorgenommen.

Die Literaturstudie zeigt, dass bezüglich NE-Schmelz- und Druckgussbetrieben keine Veröffentlichungen zu bereichsübergreifenden Prozessmanagementsystemen, die eine energetisch optimierte Steuerung der Schmelzöfen ermöglichen, verfügbar sind. Die Hochschule Ansbach arbeitet im Rahmen des Green Factory Bavaria Projektes *Smart Melting* (GFB 2017) an einem derartigen Prozessmanagementsystem. Um die komplexen Zusammenhänge des Betriebes unter unterschiedlichsten Betriebsbedingungen untersuchen zu können und das Prozessmanagementsystem ohne direkten Eingriff in die Produktion testen und verbessern zu können, wird ein Simulationsmodell des Gesamtbetriebes entwickelt. Dieses besteht aus einem Materialflussmodell, den Energiemodellen der Schmelzöfen und dem Steuerungsmodul. In dem vorliegenden Artikel werden der Aufbau des den Gesamtbetrieb abbildenden Simulationsmodells und die Kopplung der Teilmodelle beschrieben. Mit dem entwickelten und validierten Simulationsmodell werden anschließend verschiedene Betriebsszenarien und die Wirksamkeit unterschiedlicher Optimierungsmaßnahmen untersucht.

2 Grundlagen

Die vorliegende Studie bezieht sich auf einen mittelgroßen bis großen NE-Schmelz- und Druckgussbetrieb. Die zugrundeliegenden Prozesse sind nachfolgend dargestellt:

- Anlieferung von flüssigem Aluminium bzw. Blockmaterial (Masseln) (Abb. 1, a)
- Beschickung der gasbetriebenen Schachtschmelzöfen (SO) über Stapler mit Masseln, Rücklauf- oder Ausschussmaterial (Abb. 1, b)
- Erwärmen, Schmelzen und Überhitzen bzw. Warmhalten des Metalls (Abb. 1, c)

- Verteilung des flüssigen Aluminiums mit Staplern auf die Dosieröfen der Gussmaschinen (Abb. 1, d)
- Produktion von Gussteilen in den Druckgussmaschinen (DGM) und Qualitätsprüfung (Abb. 1, e)
- Transport von vollen/leeren Materialbehältern aus dem Druckgussbetrieb oder von Masselpaketen aus dem Lager zum Schmelzbetrieb (Abb. 1, f)

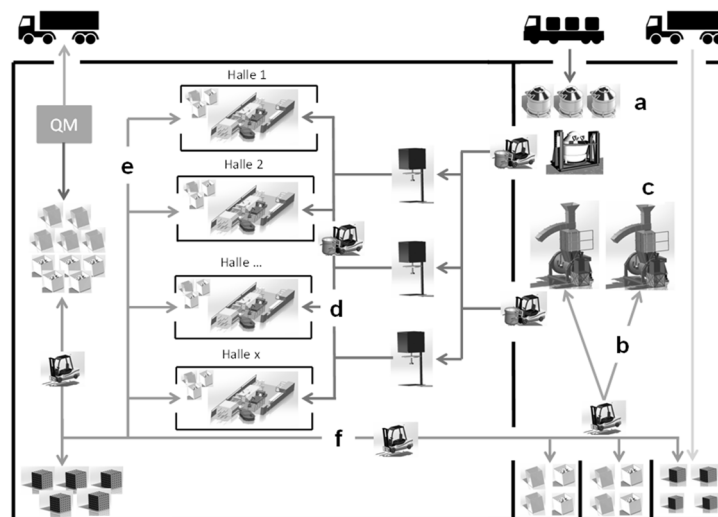


Abbildung 1: Schema eines Schmelz- und Druckgussbetriebs

Die Schmelz- und Warmhaltevorgänge (Abb. 1, c) in den Schmelzöfen stellen komplexe thermodynamische Prozesse dar, die durch eine Vielzahl an Faktoren beeinflusst werden. Um eine korrekte Simulation des gesamten Druckgussbetriebs zu ermöglichen, ist daher ein dynamisches Berechnungsmodell der Vorgänge im Innern des Ofens notwendig, das an die Simulation des Materialflusses im Betrieb gekoppelt ist.

3 Simulationsmodell

Der Aufbau des Simulationsmodells, bestehend aus den Teilmodellen Energiefluss, Materialfluss und Prozesssteuerung, ist in Abbildung 2 dargestellt. Das Energieflussmodell dient zur Berechnung der thermodynamischen Vorgänge der Aluminiumschmelzöfen. Mithilfe des Materialflussmodells wird der komplette Materialfluss innerhalb des Betriebs erfasst. Zwischen Material- und Energieflussmodell liegt eine bidirektionale Kopplung vor: Dem Energiemodell werden einerseits Informationen über eine Einbringung bzw. Entnahme von festem oder flüssigem Aluminium zur Verfügung gestellt (Abb. 2, a). Andererseits übergibt das Energiemodell dem Materialfluss die wichtigsten Ofendaten wie beispielsweise die aktuelle Schmelzleistung oder die Menge an verfügbarem Flüssialuminium (Abb. 2, b).

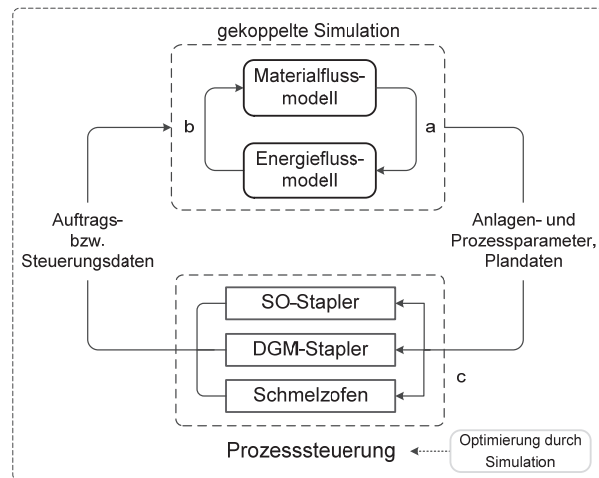


Abbildung 2: Aufbau und Struktur des Simulationsmodells

Das Modul der Prozesssteuerung (Abb. 2, c) bestimmt die Steuerungseingriffe für die Schmelzöfen und Stapler. Hierzu werden die durch das Material- und Energieflussmodell ermittelten Anlagen- und Prozessparameter eingelesen und ausgewertet. Aus diesen Daten werden geeignete Steuerungseingriffe abgeleitet, die von der Prozesssteuerung an die gekoppelte Simulation übergeben werden.

Die hybride Simulation der verschiedenen Prozesse wurde mithilfe einer Kombination der Simulationstools MATLAB, Simulink und Stateflow realisiert, die jeweils die folgenden Funktionen erfüllen:

- MATLAB: Simulationssteuerung, Objektinstanziierung und -verwaltung, Auswertung
- Simulink: Simulation der kontinuierlichen Prozesse
- Stateflow: Simulation der ereignisdiskreten Prozesse

Um die Kommunikation der einzelnen Systeme zu ermöglichen, wird eine Schnittstelle zwischen den Simulink- und Stateflow-Modellen benötigt. Diese ist durch „Interpreted MATLAB Functions“ realisiert (Abb. 3). Die IN-Funktion übergibt die notwendigen Anlagenparameter und Events an die entsprechenden Komponenten. Die Wertänderungen des Systems werden für jeden Zeitschritt in der OUT-Funktion durch Abfrage des Status ermittelt. Hier erfolgt in Abhängigkeit des Status die Anpassung der Prozessparameter.

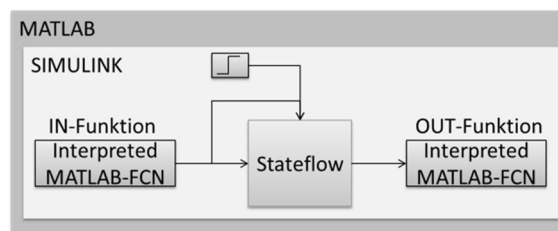


Abbildung 3: Schnittstelle zwischen MATLAB, Simulink und Stateflow

In der Simulation werden neben dem An- und Ausschalten (Simulation von Ausfallzeiten) der Komponenten die Produktionsaufträge für die Druckgussmaschinen zugewiesen. Bei der betriebsabhängigen Auftragsdatenermittlung werden die Aufträge "Just in Time" zusammengestellt und immer der aktuell „optimale“ Auftrag ermittelt.

3.1 SO-Stapler-Steuerung

Mit dieser Steuerung werden die Lagerverwaltung des festen Aluminiums und die Materialeinbringung (Beschickung) des festen Materials in die Schmelzöfen vorgenommen. Dabei werden im Wesentlichen der Zeitpunkt, die Masse und die Materialart der Beschickung vorgegeben. Die Steuerung ist somit entscheidend für den Füllstand des festen Aluminiums im Schmelzschacht. Mithilfe des Simulationsmodells können die Auswirkungen unterschiedlicher SO-Stapler-Steuerungskonzepte auf die Schmelzöfen untersucht und analysiert werden.

3.2 DGM-Stapler-Steuerung

Für den Produktionsbetrieb ist eine gesicherte Versorgung der Druckgussmaschinen mit Aluminium entscheidend. Daher kommt der Steuerung der Stapler zur Verteilung des Flüssigaluminiums, von den Schmelzöfen, über eine Impellerstation, hin zu den Druckgussmaschinen, besondere Bedeutung zu. Über den Steuerungsalgorithmus werden die Materialquelle (Schmelzöfen), die zu befüllenden Materialsenken (Druckgussmaschinen) und die daraus resultierende Entnahmemenge bestimmt.

Die zu befüllenden Druckgussmaschinen können dabei grundsätzlich anhand verschiedener Kriterien ausgewählt werden. In der Industrie erfolgt die Auswahl in der Regel über ein Ampelverfahren, das für einen bestimmten Füllstandbereich eine definierte Signalfarbe (rot – gelb - grün) aufweist. Eine Verbesserung dieser Auswahlvariante kann mithilfe der Erfassung und des Vergleichs der genauen Maschinen-Füllstände erfolgen. Eine weitere Alternative hierzu bietet die Verteilung auf Basis der Restlaufzeiten der Druckgussmaschinen. Dabei wird derjenige Dosierofen zuerst befüllt, der nach aktuellem Füllstand, gegebener Taktzeit und dem produktabhängigen Schussgewicht die geringste Restlaufzeit bis zu einem Stillstand aufgrund von Materialmangel aufweist.

4 Validierung der Simulation

Die Berechnungsergebnisse der gekoppelten Simulation können durch eine an den Referenzbetrieb angepasste Konfiguration (Beschickungsstrategie, Produktionsplan etc.) und Betriebsdaten, die schichtübergreifend für eine vollständige Kalenderwoche aufgezeichnet wurden, validiert werden.

Hierbei ergeben sich für das Materialflussmodell Abweichungen in der Anzahl der produzierten Aluminiumgussteile und der verbrauchten Aluminiummenge von 1,4 bzw. 0,9 %. Diese gehen auf ungeplante Stillstände der Druckgussmaschinen zurück, die zwar statistisch angenähert, aber nicht präzise vorausgesagt werden können.

Auch die Korrektheit des Energiemodells kann anhand der aufgezeichneten Daten bestätigt werden. Die geschmolzene Aluminiummasse und der Gasverbrauch

weichen hierbei um 1,5 bzw. 0,5 % von den tatsächlichen Werten ab. Die Genauigkeit der thermodynamischen Berechnungen wird neben der Betrachtung der geschmolzenen Aluminiummasse zusätzlich anhand des zeitlichen Verlaufs der Rauchgastemperatur deutlich (s. Abb. 4).

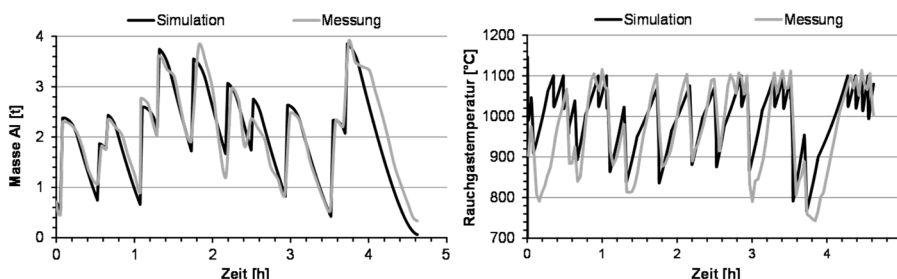


Abbildung 4: Validierung des Energiemodells anhand der geschmolzenen Aluminiummasse und der Gastemperatur

5 Ergebnisse

Die Validierungsergebnisse demonstrieren, dass mithilfe des Simulationsmodells eine präzise Abbildung des realen Betriebs möglich ist. Auf Basis dieser Ausgangskonfiguration werden verschiedene Betriebsszenarien und die Wirksamkeit einzelner Optimierungsmaßnahmen untersucht. Diese beinhalten:

- Variation der SO-Stapler-Steuerung (Beschickungsstrategie)
- Vorwärmung des festen Aluminiums
- Variation des Flüssialuminiumverbrauchs durch Anpassung der Ausfallzeiten
- Variation der Flüssialuminiumerzeugung durch Abschaltung einzelner Öfen
- Variation der angelieferten Flüssialuminiummenge (vgl. Abb. 1, a)

Das Simulationsmodell erlaubt die Variation verschiedener Parameter und Strategien und erfasst ihre Auswirkungen auf Material- und Energiefluss, sodass eine Bewertung der einzelnen Maßnahmen hinsichtlich maßgeblicher Faktoren wie Produktivität, Produktionssicherheit und Energieeffizienz möglich wird.

5.1 Einfluss der Ausfallzeiten auf die Produktivität

Als Bewertungszahl für die Produktivität des Betriebs eignet sich neben der Anzahl produzierter Aluminiumgussteile insbesondere die *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) der Druckgussmaschinen, die als Maß der Anlagenverfügbarkeit dient.

Aus den Messungen im untersuchten Referenzbetrieb ergeben sich Ausfallzeiten (geplant und ungeplant) der Druckgussmaschinen in Höhe von 30 % der Gesamtlaufzeit. In dieser Konfiguration begrenzen ausschließlich die Druckgussmaschinen die erzielbare Produktivität des Betriebs; es liegt also ein Überschuss an Flüssialuminium vor. Durch Reduktion der Ausfallzeiten (beispielsweise durch Realisierung eines verbesserten Wartungskonzepts) kann die Produktivität des Gesamtbetriebs deutlich gesteigert werden. Die Auswirkungen reduzierter Ausfallzeiten auf die Produktivität können in der Simulation berechnet und dargestellt werden (Abb. 5).

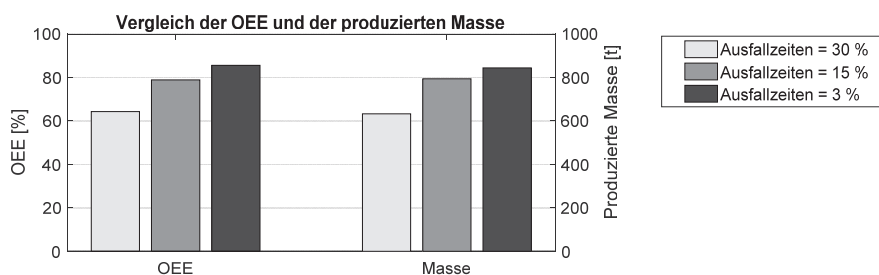


Abbildung 5: Auswirkungen der Ausfallzeiten auf die Produktivität

Infolge einer Reduktion der Ausfallzeiten auf 15 % der Gesamtlaufzeit kann die OEE von 64 % auf 79 % gesteigert werden. Eine weitere Senkung der Ausfallzeiten auf 3 % resultiert wiederum in einer erkennbaren Steigerung der Kennzahl auf 85 %, wobei eine Abschwächung des Effekts erkennbar ist, die aus zusätzlichen Einflussfaktoren auf die OEE, bspw. Ausschussrate und Aluminiummangel (s. Abschnitt 5.2) resultiert.

Abbildung 5 zeigt weiterhin, dass auch die erzeugte Aluminiummasse der Schmelzöfen direkt proportional zu der Verfügbarkeit der Druckgussmaschinen ansteigt. Als Nebeneffekt der Produktivitätssteigerung kommt es also zu einer Zunahme der Schmelzofenauslastung. Für hohe Produktivitätswerte (Ausfallzeiten 3 %) kann der Flüssigaluminiumverbrauch jedoch die Kapazität der Schmelzöfen überschreiten, sodass neben den bisher betrachteten geplanten und ungeplanten Stillständen auch Ausfälle der Druckgussmaschinen aufgrund Aluminiummangels auftreten können.

5.2 Erhöhung der Produktionssicherheit

Um die Produktionssicherheit des Betriebs zu gewährleisten, können Maßnahmen getroffen werden, die die Erzeugungsrates des Flüssigaluminiums in den Schmelzöfen erhöhen. Die Implementation eines Energiemodells in die Simulation ermöglicht die Untersuchung verschiedener Eingriffsmöglichkeiten.

Hierbei zeigen insbesondere die Vorwärmung des festen Aluminiums (bspw. mithilfe einer externen Vorwärmkammer realisierbar) und eine verbesserte Beschickung der Schmelzöfen, die auf möglichst hohe Füllstände der Schmelzschächte abzielt, deutliche Auswirkungen (s. Abb. 6).

Für Ausfallzeiten von 3 % lässt sich mittels Vorwärmung des Ausgangsmaterials auf 300 °C oder optimierter Beschickung eine deutliche Erhöhung der Produktionssicherheit realisieren. So sinkt der Anteil der durch Aluminiummangel resultierenden Anlagenausfälle von 1,7 % auf 0,3 % (Vorwärmung) bzw. 0 % (Beschickung) der betrachteten Zeitdauer. Dadurch kommt es zudem zu einer erkennbaren Steigerung der Betriebsproduktivität, wobei für eine optimierte Beschickung Werte der OEE von über 90 % erzielt werden.

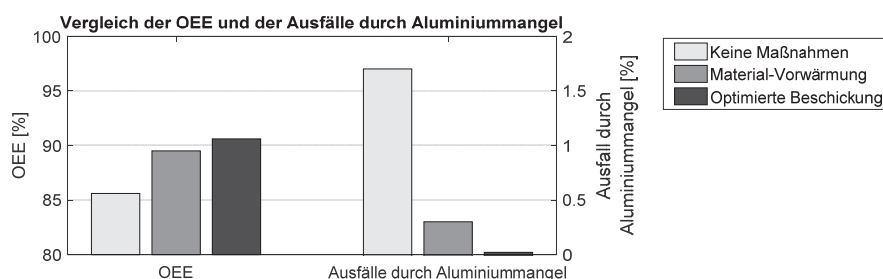


Abbildung 6: Auswirkung der Maßnahmen zur Erhöhung der Produktionssicherheit bei Ausfallzeiten von 3 %

Eine weitere Folge der gezeigten Maßnahmen stellt eine Erhöhung der Energieeffizienz der Schmelzöfen dar. Während der durchschnittliche spezifische Energieverbrauch bei Ausfallzeiten von 3 % bei 910 kWh/t liegt, kann durch die Vorwärmung eine Senkung um ca. 9 % auf 825 kWh/t beobachtet werden. Die Optimierung der Beschickungsstrategie mit dem Ziel der Gewährleistung hoher Schmelzschachtfüllstände bewirkt eine noch deutlichere Effizienzsteigerung in Höhe von ca. 20 % (spez. Energieverbrauch: 720 kWh/t).

Im realen Betrieb können die oben genannten Verbesserungen aufgrund betrieblicher Vorgänge oder thermischer Verluste nur teilweise erzielt werden. Aus den Ergebnissen kann aber geschlossen werden, dass eine logistische Maßnahme in Form optimierter Beschickungsvorgänge gegenüber einer kostenintensiveren Vorwärmkammer deutliche Verbesserungen der Produktivität, Produktionssicherheit und Energieeffizienz aufweist. Die bisher genannten Maßnahmen können ihr volles Potenzial jedoch nur in Kombination mit deutlichen Reduktionen der Anlagen-Ausfallzeiten oder durch Installation zusätzlicher Druckgussmaschinen realisieren. Da beide Maßnahmen mit einem großen zeitlichen bzw. finanziellen Aufwand verbunden sind, kann anstelle der Erhöhung der Druckgusskapazität auch eine Senkung der Produktionskapazität für Flüssigaluminium angestrebt werden, um eine höhere Auslastung der Öfen und damit eine Verbesserung des Energieverbrauchs zu erzielen.

5.3 Energieeffizienzmaßnahmen

Eine Erhöhung der Schmelzofenauslastung kann auf zwei Arten realisiert werden: einerseits durch Abschaltung bzw. Standby-Betrieb einzelner Öfen, alternativ durch Reduktion der angelieferten Flüssigaluminiummenge.

Zur Untersuchung dieser Effizienzmaßnahmen wird ein Schmelzofen (von vier im Referenzbetrieb) innerhalb der Simulation abgeschaltet und der resultierende spezifische Energieverbrauch der verbliebenen Öfen mit den im realen Betrieb auftretenden Werten verglichen (s. Abb. 7). In einem weiteren Simulationslauf wird die Flüssigaluminiumanlieferung deutlich reduziert (10 % des Ursprungswerts). Bei Ausfallzeiten von 30 % treten keine Betriebsausfälle aufgrund Aluminiummangels auf, sodass die Produktionssicherheit gewährleistet bleibt.

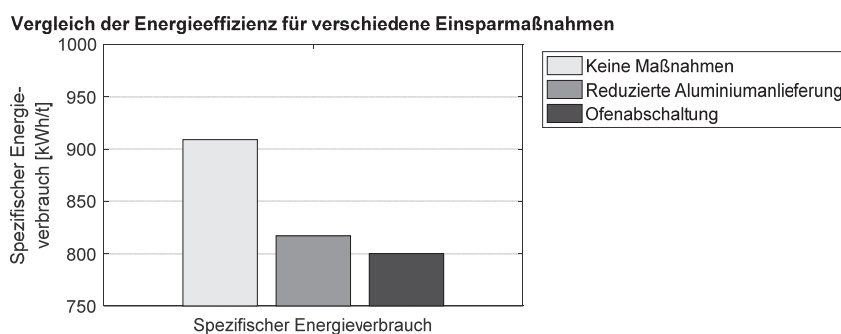


Abbildung 7: Spezifischer Energieverbrauch für verschiedene Einsparmaßnahmen bei Ausfallzeiten von 30 %

Mithilfe der beschriebenen Maßnahmen lässt sich eine Senkung des spezifischen Energieverbrauchs um 10 % (reduzierte Flüssigaluminiumanlieferung) bzw. 12 % (Ofenabschaltung) realisieren. Anders als die unter Abschnitt 5.2 beschriebenen Verbesserungen, ist die Senkung der Produktionskapazität für Flüssigaluminium jedoch nicht mit einer Erhöhung der Produktionssicherheit verbunden, sondern stellt stattdessen ein Risiko für diese dar. Daher sollten entsprechende Maßnahmen nur mit ausführlicher Vorbereitung umgesetzt werden. Mithilfe der Simulation ist es hierbei möglich, Verbesserungspotenziale zu bestimmen, ohne den realen Betrieb zu gefährden.

6 Ausblick

Im Rahmen der vorgenommenen Simulationsstudien wird gezeigt, dass die Auslastung der Schmelzöfen einen erheblichen Einfluss auf deren Energieeffizienz besitzt. Um die globale Energieeffizienz der Öfen in den unterschiedlichen Betriebssituationen zu verbessern, soll das Steuerungsmodul um eine intelligente Ofensteuerung erweitert werden. Diese soll in Abhängigkeit der Aluminiumnachfrage und der Speichersituation die Betriebsweise der Schmelzöfen und die Aluminiumentnahme so vorgeben, dass die Produktion bei minimalem Energieeinsatz gesichert ist.

Eine Anpassung der DGM-Stapler-Steuerung gemäß der bisher verwendeten, in Abschnitt 3.2 vorgestellten, Strategien zeigt keine Verbesserungen der betrieblichen Kennzahlen. In Zukunft soll daher eine weitere Steuerungsvariante für die DGM-Stapler entwickelt werden. Mit dieser soll eine modifizierte „Just in Time“ Lösung in Bezug auf die Befüllung der Druckgussmaschinen realisiert werden. Auch hier wird für die Befüllungsstrategie eine Analyse der Bedarfs- und Vorratssituation des Flüssigaluminiums für eine Sicherstellung der Produktion herangezogen. Die Restlaufzeit einer Druckgussmaschine soll dann jedoch auch geplante Stillstände berücksichtigen, sodass keine Befüllungen vor längeren Ausfallzeiten durchgeführt werden. Zusätzlich werden für diese Stapler-Steuerung Strategien für extreme Produktionsfälle, wie einer längeren Aluminiumknappheit infolge eines Schmelzofenausfalls konzipiert und implementiert. Mit dieser Steuerungsvariante kann anschließend untersucht werden, wie sich eine veränderte Befüllungsstrategie auf die Gesamtenergieeffizienz des Betriebs auswirkt.

Hierzu ist ebenfalls eine Erweiterung des im Rahmen dieser Veröffentlichung beschriebenen Energiemodells nötig, das bisher ausschließlich die Schmelzöfen berücksichtigt. Ziel von weiteren simulativen Untersuchungen ist es, das energetische Modell auf die gesamte Flüssigaluminiumkette innerhalb des Betriebes zu erweitern. Diese Erweiterung schließt die Flüssigaluminiumspeicher der Druckgussmaschinen, die einen relativ hohen Stromverbrauch aufweisen, mit ein.

Literatur

- Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU): Effiziente Energieverwendung in der Industrie. Augsburg 2005.
- Belt, C.: Current State of Aluminum Melting and Holding Furnaces in Industry. *JOM* 67 (2015) 11, S. 2690–2695.
- 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, Ecofys Germany GmbH, Düsseldorf, 2013.
- Felder, P.; Flückiger, U.; Wisskopf, T.: Gießereibetrieb - Pinch-Analyse Prozessanlagen und Heizungsanlagen: Schlussbericht. EnergieSchweiz, Bern, 2014.
- Fuss, E.; Beißert, U.: Beitrag zur Energie- und Materialflusssimulation in Produktion und Logistik. In: Fraunhofer IFF (Hrsg.): 19. Magdeburger Logistiktage: Tagungsband im Rahmen der IFF-Wissenschaftstage Magdeburg. 2014, S. 35–46.
- Fuss, E.; Drvendzija, S.; Krewald, A.: Transparenz als Schlüssel zur energieeffizienten Produktion: Ablaufplanung in Schmelzerei und Gießerei mittels planungsbegleitender Energie- und Materialflusssimulation. *Productivity management* 18 (2013) 3, S. 35–38.
- Green Factory Bavaria (GFB): Projektbeschreibung Smart Melting. http://greenfactorybavaria.de/gf/cms/front_content.php?idcat=90. Letzter Zugriff am 26.07.2017.
- Herrmann, C.; Pries, H.; Hartmann, G.: Energie- und ressourceneffiziente Produktion von Aluminiumdruckguss. Berlin: Springer Vieweg 2013.
- Junge, M.: Simulationsgestützte Entwicklung und Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung. Kassel: Kassel Univ. Press 2007.
- Krause, M.; Thiede, S.; Herrmann, C.; Butz, F.: A Material and Energy Flow Oriented Method for Enhancing Energy and Resource Efficiency in Aluminium Foundries. In: Dornfeld, D.; Linke, B. (Hrsg.): Leveraging Technology for a Sustainable World. Berlin Heidelberg: Springer 2012, S. 281–286.
- Peter, T.; Wenzel, S.: Simulationsgestützte Planung und Bewertung der Energieeffizienz für Produktionssysteme in der Automobilindustrie. In: Rabe, M.; Clausen, U. (Hrsg.): Simulation in production and logistics 2015. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2015, S. 535–544.
- Salonitis, K.; Zeng, B.; Mehrabi, H. A.; Jolly, M.: The Challenges for Energy Efficient Casting Processes. *Procedia CIRP* 40 (2016), S. 24–29.
- Schimansky, C.: Energiepolitik. <http://www.bdguss.de/themen/energie/#.WLAU5PJCMQM>. Letzter Zugriff am 26.07.2017.