

# Simulationsgestützte Optimierung des Materialflusses in einem Aluminium-Gussbetrieb

Johannes Dettelbacher\*, Wolfgang Schlüter

Hochschule Ansbach, Residenzstraße 8, 91522 Ansbach, \*johannes.dettelbacher@hs-ansbach.de

**Abstract.** Aluminium-Druckgussbetriebe haben aufgrund ihres hohen Energieverbrauchs ein besonders großes Energieeinsparpotential und bieten sich für Optimierungsmaßnahmen an. In vorherigen Arbeiten wurde bereits gezeigt, dass die innerbetriebliche Verteilung des Flüssigaluminiums die Energieeffizienz beeinflusst. Ausgehend davon wird die Entwicklung eines Softwaretools beschrieben, welches Handlungsempfehlungen über die innerbetrieblichen Prozessabläufe ausgibt. In der Software wird ein Optimierungsmodell mit einer Simulation des Gussbetriebes gekoppelt. Das Ziel ist die Optimierung des innerbetrieblichen Materialflusses hinsichtlich der Energieeffizienz und der Auslastung der Produktionsmaschinen. Die Empfehlungen werden anschließend anhand einer Simulation auf ihre Aussagekraft beurteilt. In Rahmen der Arbeit wird das Optimierungsmodell hinsichtlich seiner Eignung bewertet. Dabei werden die Vorteile der Kopplung von Simulation und Optimierung und die Einsatzmöglichkeiten in der Aluminium-Gussbranche herausgearbeitet und insbesondere der Mehrwert zu dem Einsatz einer einfachen Simulation quantifiziert.

## Einleitung

Aufgrund der Energiewende und der steigenden Konkurrenz durch die Globalisierung hat die Energieeffizienz insbesondere in Deutschland stark an Bedeutung zugenommen. Ein besonders hohes Energie- und Kosteneinsparungspotenzial ist dabei in energieintensiven Branchen, wie z. B. der Nichteisen (NE)-Schmelz- und Druckgussindustrie, zu finden. Bei der Aluminium-Gussindustrie zeigt sich die Energiekostenbelastung, welche 25 % der Bruttowertschöpfung übersteigen kann [1]. Um Einsparpotentiale und Energieeffizienzmaßnahmen besser zu beurteilen, wurde eine Material- und Energieflusssimulation entwickelt, mit welcher sich beliebige Aluminium-Schmelz- und Gussbetriebe abbilden lassen. Anhand der Simulation konnte in vorherigen Arbeiten bereits gezeigt werden, dass die Steuerung von innerbetrieblichen Abläufen die Energie- und Anlageneffizienz erheblich beeinflusst [2]. Ein großes Potential wird der Verteilung des Aluminiums durch Stapler zugeschrieben. Ausgehend hiervon wird ein Optimierungsmodell entwickelt, wel-

ches die Generierung von Stapleraufträgen für die Druckgussmaschinen (DGM) unterstützt. Um das Optimierungsmodell und dessen Ergebnisse auf die Realisierbarkeit sowie das Potential der Energieeinsparung zu bewerten, werden diese an die Simulation übergeben und in der implementierten Prozesssteuerung berücksichtigt. Im Rahmen der Arbeit werden die verwendeten Modelle und die Schnittstelle beschrieben. Des Weiteren werden die Ergebnisse des Optimierers sowie deren Implementierung in die Simulation bewertet und der Mehrwert der Software herausgearbeitet.

## 1 Aluminium-Gussbetrieb

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Aluminium-Druckgussbetrieb, wie er in Abbildung 1 dargestellt wird, untersucht. Der Betriebsablauf umfasst sowohl kontinuierliche (z. B. Schmelzen) als auch ereignisdiskrete (z. B. Staplertransport) Prozessschritte.

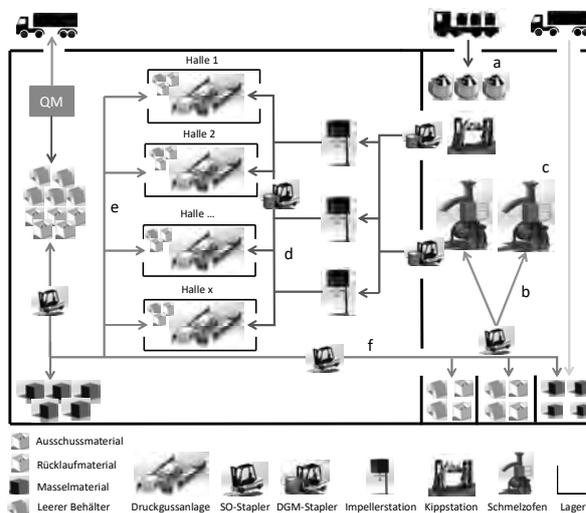


Abbildung 1: Schema eines Aluminium-Druckgussbetriebs mit Prozessschritten

Die zugrundeliegenden Prozesse sind:

- Anlieferung von flüssigem Aluminium (Abb. 1, a),
- Beschickung der gasbetriebenen Schachtschmelzöfen über Stapler mit Masseln (Metallbarren), 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 Druckgussmaschinen (Abb. 1, d)
- Produktion von Gussteilen in den Druckgussanlagen und Qualitätsprüfung (Abb. 1, e)
- Transport von Materialbehältern aus dem Druckgussbetrieb oder von Masselpaketen aus dem Lager zum Schmelzbetrieb (Abb. 1, f)

Im Fokus dieser Untersuchung steht die Verteilung des Flüssigaluminiums zu den einzelnen Druckgussmaschinen. Daher wird die Verteilung im Folgenden genauer beschrieben. Das flüssige Aluminium wird entweder aus der Kippstation oder aus den Ofenwannen entnommen und mit den DGM-Staplern zu den Druckgussmaschinen geliefert. Dazwischen erfolgt bei einem Zwischenstopp an einer Impellerstation ein Reinigungsprozess des Aluminiums. Eine Belieferung mit einem DGM-Stapler umfasst die Befüllung von bis zu zwei Druckgussmaschinen, welche mit der selben Legierung produzieren. An den Druckgussmaschinen wird das Aluminium in den elektrisch beheizten Dosieröfen warmgehalten, bis es zu Bauteilen gegossen wird. Der Materialverbrauch der Druckgussmaschinen ist hierbei abhängig von dem Bruttogewicht und der Taktzeit der gegossenen Bauteile. Die Druckgussmaschinen können je nach Produktionsplan auch Bauteile unterschiedlicher Legierung produzieren. Des Weiteren beeinflussen Maschinenstörungen und Ausfälle den tatsächlichen Verbrauch des Flüssigaluminiums. Beim Füllstand eines Dosierofens zeigen sich konkurrierende Ziele. Zum einen sorgt ein hoher Füllstand für eine hohe Versorgungssicherheit und vermeidet Ausfälle aufgrund von Aluminiummangel. Zum anderen führt eine kürzere Warmhaldedauer des Aluminiums dazu bei, die Materialeigenschaften und den Energieverbrauch zu optimieren. Insbesondere der Energieverbrauch in den elektrisch beheizten Dosieröfen verursacht einen Großteil der Energiekosten.

## 2 Optimierungsmodell

Das Ziel des Optimierungsmodells ist, die Verteilung des Flüssigaluminiums auf die Druckgussmaschinen zu optimieren. Im Modell wird bestimmt, wann welche Druckgussmaschine optimal zu beliefern ist. Hierfür wird eine dynamische Optimierung verwendet, welche alle be-

trachteten Zeitpunkte in einem Gleichungssystem berücksichtigt. Um die Rechenzeit und Komplexität des Modells gering zu halten, werden als Zeitpunkte jeweils einmündige Zeitintervalle verwendet. Auch werden die Materialquellen wie z. B. Ofenwannen und die Impellerstationen als Zwischenstationen in diesem Modell nicht explizit betrachtet. Als Variablen im Optimierungsmodell werden die Belieferungen der Dosieröfen zu den gegebenen Zeitpunkten definiert. Somit ergibt sich für die Variablen eine Matrix aus der Anzahl der Druckgussmaschinen und der Anzahl der betrachteten Zeitpunkte. Die Variablen können für jeden Zeitpunkt sowie jeder Druckgussmaschine jeweils Zustand 1 (Befüllen) oder Zustand 0 (Nicht Befüllen) annehmen. Die Belieferungsmenge wird hierbei bereits vorgegeben und hängt maschinenspezifisch vom Fassungsvermögen des jeweiligen Dosierofens ab. Es ergibt sich ein ganzzahliges lineares Optimierungsproblem, welches im Rahmen des Modells beschrieben und gelöst wird. Für die Optimierung werden Eingangsgrößen, wie die Materialverbräuche der Druckgussmaschinen, die aktuellen Füllstände und das Fassungsvermögen der Dosieröfen sowie die Anzahl und die Fahrtzeiten der DGM-Stapler aus der Anlagen- und Betriebskonfiguration eingelesen. Ausgehend von diesen Daten werden die Zielfunktion und die Nebenbedingungen definiert. Im Rahmen dieser Arbeit werden mit dem Optimierungsmodell die Belieferungszeiten für einen Zeitraum von 5 Stunden bzw. 300 Minuten bestimmt. Implementiert wurde das Optimierungsmodell in Matlab. Im Folgenden werden die verwendete Zielfunktion sowie die Nebenbedingungen der Optimierung beschrieben.

### 2.1 Zielfunktion

Die Zielfunktion umfasst die gesamten Füllstände  $y_{DGM,t}$  aller Dosieröfen über den gesamten Betrachtungsraum und wird im Rahmen der Optimierung minimiert.

$$\min \sum_{DGM=1}^k \sum_{t=Start}^{t,Ende} y_{DGM,t} \quad (1)$$

Damit wird bezweckt, dass stets so wenig Aluminium wie möglich in den Dosieröfen warmgehalten wird. Die Füllstände der Dosieröfen sind über Nebenbedingungen definiert und ergeben sich jeweils aus dem vorherigen Füllstand der Maschine und die mögliche Füllstandsänderung durch Belieferung und Materialverbrauch.

### 2.2 Nebenbedingungen

Weiterhin werden die Bedingungen vorgegeben, dass der Füllstand weder das maximale Fassungsvermögen übersteigen sowie einen minimalen Füllstand unterschreiten darf. Der minimale Füllstand, welcher für eine Produktionssicherheit sorgt, wird maschinenspezifisch über den Verbrauch ermittelt. Dazu wird vorgegeben, dass jede

Maschine zu jedem Zeitpunkt über mindestens 30 Minuten Restlaufzeit verfügt. Damit wird für eine ausreichende Versorgungssicherheit der Produktionsmaschinen gesorgt. Weiterhin wird vorgegeben, dass nur die Anzahl an Belieferungen in einem bestimmten Zeitintervall möglich sind, welche die Anzahl der DGM-Stapler bei einer angenommenen Belieferungszeit realisieren können.

### 3 Simulationsmodell

Das Simulationsmodell, welches die Optimierungsergebnisse auf ihre Aussagekraft beurteilen soll, bildet den gesamten Aluminium-Druckgussbetrieb mit den dazugehörigen Prozessschritten ab. Das Modell lässt sich, wie in Abbildung 2 dargestellt, in die Teilmodelle Energieflussmodell, Materialflussmodell und Prozesssteuerung untergliedern.

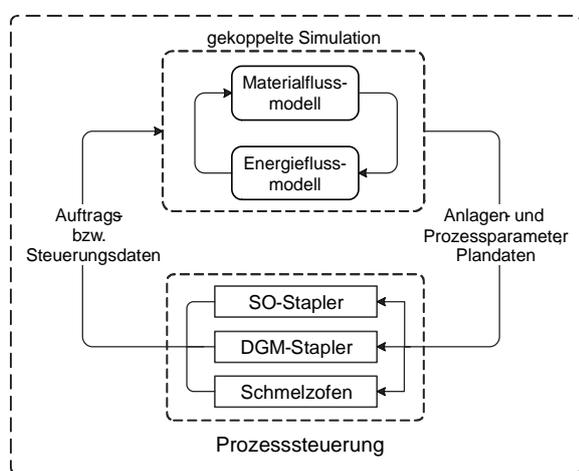


Abbildung 2: Bestandteile der hochdetaillierten Betriebs-simulation

Während im Energieflussmodell die thermodynamischen Vorgänge in den Aluminiumschmelzöfen betrachtet werden, erfasst das Materialflussmodell den Materialfluss des festen und flüssigen Aluminiums innerhalb des Betriebes. Zwischen den Modellen liegt eine bidirektionale Kopplung vor, da die Schmelzleistung sowohl von Materialfluss als auch vom Energiefluss abhängt. In der Prozesssteuerung wird der Betriebsablauf gesteuert. Ein besonderer Fokus liegt hierbei auf die Steuerung der SO-Stapler und der DGM-Stapler. Eine besondere Relevanz in dieser Untersuchung hat die Steuerung der DGM-Stapler, die im Folgenden genauer beschrieben wird. Eine ausführlichere Beschreibung der einzelnen Teilmodelle wurde von Schlüter und Buswell vorgenommen [2, 3, 4].

#### 3.1 DGM-Stapler-Steuerung

Eine stetig gesicherte Versorgung der Druckgussmaschinen mit Aluminium ist für den Produktionsbetrieb entscheidend. Die Prozesssteuerung wird zu jedem Zeitpunkt innerhalb des Simulationsmodells ausgeführt und erzeugt je nach Versorgungssituation und Verfügbarkeit der Stapler die Stapleraufträge. Über einen Steuerungsalgorithmus werden die Materialquelle (Ofenwanne/Kippstation), die zu befüllenden Materialsinken (Druckgussmaschinen), die verwendete Impellerstation und die resultierende Entnahmemenge bestimmt. Bei der Bestimmung der zu befüllenden Druckgussmaschinen können unterschiedliche Kriterien ausgewählt werden. Bei dem Ampelverfahren, welches auch in Industriebetrieben verwendet wird, wird einem bestimmten Füllstandbereich eine definierte Signalfarbe (rot – gelb – grün) zugewiesen, welche die Priorisierung der Druckgussmaschinen bestimmt. Verbesserte Varianten berücksichtigen den genauen Füllstand der Maschinen und berechnen die Restlaufzeiten der einzelnen Druckgussmaschinen. Je nach Versorgungssituation und ausgewählter Steuerungsstrategie wird die Belieferung von bis zu zwei Druckgussmaschinen zu einem Auftrag zusammengefasst. Der Auftrag wird anschließend von der Prozesssteuerung generiert und an die gekoppelte Simulation übergeben und ausgeführt.

#### 3.2 Umsetzung der Simulation

Für den Aufbau der Simulation wird ein objektorientierter Ansatz verfolgt. Als Simulationsumgebung für das Simulationsmodell wird Matlab, Simulink und Stateflow verwendet. Während Simulink für die Simulation der kontinuierlichen Prozesse und Stateflow für die ereignisdiskreten Prozesse genutzt wird, dient Matlab hauptsächlich für die Simulationssteuerung und der Objekterzeugung und -verwaltung.

#### 3.3 Validierung der Simulation

Die gekoppelte Simulation konnte in vorherigen Arbeiten durch Betriebsdaten zwei realer Betriebe validiert werden. Für das Materialflussmodell ergeben sich Abweichungen in der Anzahl der produzierten Aluminiumguteile und der verbrauchten Aluminiummenge von 1,4 bzw. 0,9 %. Bei dem Energieflussmodell weichen geschmolzene Aluminiummasse und der Gasverbrauch um 1,5 bzw. 0,5 % von den tatsächlichen Werten ab.

### 4 Kopplung

Im Rahmen dieser Arbeit wird die entwickelte Optimierung mit der Simulation gekoppelt. Dieser Ansatz kombiniert die Vorteile beider Werkzeuge. Während die Optimierung die beste Parameterauswahl findet, wird die Si-

mulation für die Bewertung und Überprüfung der Optimierungsergebnisse verwendet [5]. Die Optimierung startet zuerst und leitet die Ergebnisse an die Simulation weiter. Der Ablauf, wie er in Abbildung 3 dargestellt ist, wird im Folgenden genauer beschrieben.

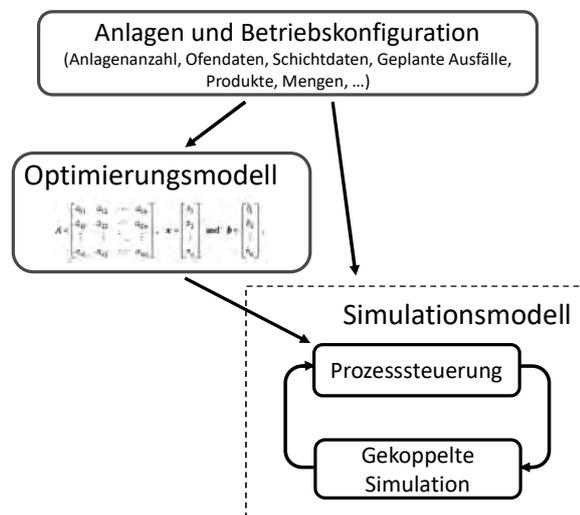


Abbildung 3: Kopplung von Optimierung und Simulation

Nachdem vom Optimierungsmodell die Belieferungszeiten der Druckgussmaschinen für eine optimale Zielerreichung bestimmt wurden, werden diese in ein Matlab-File gespeichert. Dieses File wird anschließend in der Simulation geladen und die Werte beim Start der Simulation der Prozesssteuerung übergeben. Bei der Generierung der neuer DGM-Stapleraufträge wird eine neue Steuerungsstrategie implementiert, welche die von der Optimierung bestimmten Druckgussmaschinen mit der jeweiligen Belieferungsmenge einkalkuliert. Bei der Erzeugung neuer DGM-Stapleraufträge im Simulationsmodell laufen unterschiedliche Funktionen nacheinander ab. Zuerst wird geprüft, ob eine vorgegebene Belieferung aus der Vergangenheit noch aussteht. Ist dies der Fall, wird die am weitesten zurückliegende Belieferung für den neuen Auftrag übernommen. Anschließend wird in einem Intervallbereich von 15 Minuten um der übernommenen Belieferung nach weiteren Belieferungen gesucht. Wenn eine weitere gefunden wird, wird diese ebenfalls in diesen Auftrag zusammengefasst. Falls keine weitere Belieferung in diesem Intervallbereich vorliegt, wird lediglich die eine zu beliefernde Druckgussmaschine im Auftrag hinterlegt. Für den Fall, dass keine Belieferung aus der Vergangenheit aussteht, wird nach Belieferungen in naher Zukunft gesucht. Es wird ein Zeitraum von maximal 10 Minuten betrachtet. Liegt eine Belieferung vor, wird gleichermaßen in einem Intervallbereich von 15 Minuten nach weiteren Belieferungen gesucht. Die zu beliefernden Druckgussmaschinen werden in einem Auftrag gespeichert. Während das Optimierungsmodell nur vorgibt,

welche Druckgussmaschine zu welchem Zeitpunkt beliefert werden muss, muss die Bestimmung der Materialquelle und die Auswahl der Impellerstation weiterhin unabhängig von der Steuerung innerhalb der Simulation erfolgen.

## 5 Ergebnisse

Im Rahmen der Untersuchung werden zwei Betriebe mit den Modellen untersucht:

- Betrieb 1 mit 5 Schmelzöfen, 24 Druckgussmaschinen und ohne zusätzlicher Anlieferung von Flüssigaluminium
- Betrieb 2 mit 4 Schmelzöfen, 31 Druckgussmaschinen und zusätzlicher Anlieferung von Flüssigaluminium

Zum einen wird betrachtet, welche Ergebnisse der Optimierung liefert und wie diese in der Simulation umgesetzt werden. Zum anderen wird untersucht, welchen Einfluss die Optimierung auf die Produktionssicherheit und Energieeffizienz des Betriebes hat.

### 5.1 Optimierungsergebnisse

Die Ergebnisse des Optimierungsmodells geben an, zu welchem Zeitpunkt welche Druckgussmaschine befüllt werden soll. Um diese Resultate zu visualisieren, wird aus den Befüllungen und dem Materialverbrauch der Maschinen der zeitliche Verlauf der voraussichtlichen Füllstände berechnet. Ein solcher zeitlicher Verlauf ist in Abbildung 4 für Betrieb 2 dargestellt. Es zeigt sich, dass für jede Druckgussmaschine stets ausreichend Aluminium für die Produktion zur Verfügung steht. Auch wird deutlich, dass Maschinen mit einem höheren Materialverbrauch einen höheren Mindestfüllstand aufweisen, um eine Restlaufzeit von 30 Minuten zu gewährleisten.

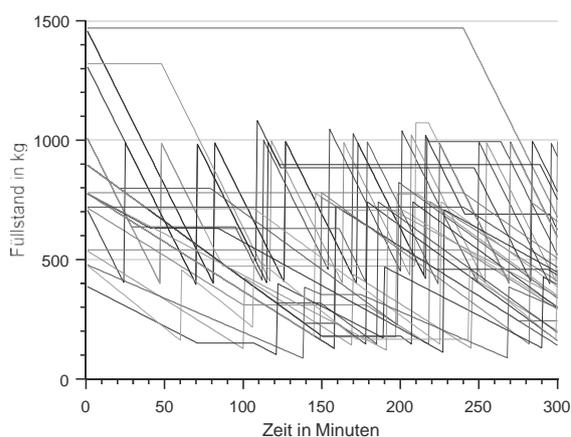


Abbildung 4: Füllstände der Dosieröfen im Optimierungsergebnis

## 5.2 Implementierung in die Simulation

Bei der Implementierung der Optimierungsergebnisse in der Simulation wird untersucht, wie die geplanten Befüllungen der Optimierung mit den tatsächlich umgesetzten Befüllungen in der Simulation übereinstimmen. Damit wird überprüft, ob die vereinfachte Betrachtung im Optimierungsmodell ausreicht, um umsetzbare Ergebnisse zu liefern. Hierfür wird beispielhaft der Materialverlauf im Dosierofen der Druckgussmaschine 1 in Abbildung 5 dargestellt. Es wird ersichtlich, dass die vom Optimierer erzeugten Belieferungen in der Simulation umgesetzt wurden. Lediglich der Zeitpunkt der Umsetzung kann sich in Simulation durch die Verfügbarkeit der Stapler und der Dauer der Staplerfahrt unterscheiden. Bei einer hohen Auslastung der Stapler konnte eine Verzögerung der Belieferung von bis zu 13 Minuten auftreten. Da jedoch durch die Optimierung ein Mindestfüllstand für eine Restlaufzeit von 30 Minuten vorgegeben wird, ist zu keinem Zeitpunkt die Produktionssicherheit gefährdet.

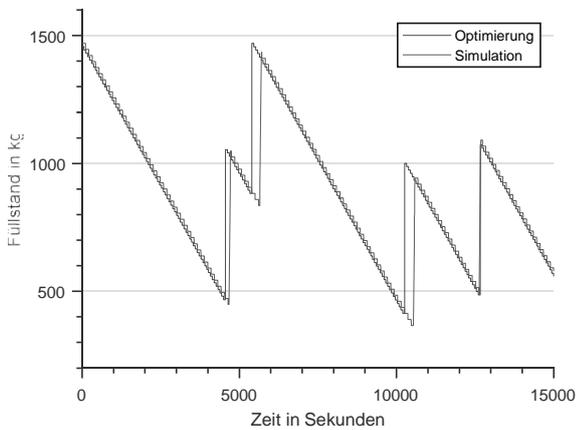


Abbildung 5: Druckgussfüllstand in Optimierung und Simulation

## 5.3 Bewertung der Optimierungsergebnisse

Ziel des Optimierungsalgorithmus ist die Bestimmung der optimalen Belieferungszeiten für eine optimale Zielerreichung. Als Ziel wurde eine möglichst geringe Aluminiummenge in den Dosieröfen bei kontinuierlich gegebener Produktionssicherheit definiert. Um die Vorteile der Optimierungsergebnisse zu anderen Steuerungsalgorithmen zu untersuchen, wird der mittlere Füllstand in den Dosieröfen bei verschiedenen Steuerungen verglichen. Die Ergebnisse hierzu sind in Tabelle 1 dargestellt. Es kann gezeigt werden, dass mit der Steuerung über eine Optimierung eine deutliche Reduzierung der Warmhalte-masse erreicht werden kann. Dieser Effekt konnte anhand beider Betriebe verdeutlicht werden. Die durchschnittliche Aluminiummenge in den Dosieröfen reduziert sich in

beiden Fällen etwa um 40 %. Die Reduzierung hängt jedoch auch maßgeblich von Faktoren wie Auslastung und Störfällen an den Druckgussmaschinen ab.

	Betrieb 1	Betrieb 2
<b>Durchschnittliche Masse in den Dosieröfen bei der Steuerung über relative Füllstand [kg]</b>	13467	32102
<b>Durchschnittliche Masse in den Dosieröfen bei der Steuerung über mathematische Optimierung [kg]</b>	8031	19039
<b>Einsparung der Warmhalte-masse [%]</b>	40,4	40,7

Tabelle 1: Dosierofenmasse bei unterschiedlichen DGM-Staplersteuerungen

Weiterhin sind bei beiden Steuerungen keine Ausfälle aufgrund von Aluminiummangel aufgetreten. Eine genaue Kalkulation der möglichen Energieeinsparung durch die Optimierung ist im Simulationsmodell noch nicht möglich, da das vorhandene Energiemodell lediglich die Schmelzöfen und Ofenwannen abbildet. Hierfür bietet sich an, die Energiebetrachtung in weiteren Untersuchungen auch auf die Druckgussmaschinen auszuweiten.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Optimierungsmodell für die Verteilung des Flüssigaluminiums zu den Druckgussmaschinen aufgebaut. Dieses Modell dient zur optimalen Parameterwahl und wird mit einer Simulation, welche die Umsetzung und Bewertung der Parameter erzeugt, gekoppelt. Die einzelnen Modelle sowie die Kopplung der beiden Modelle wurden im Rahmen dieser Arbeit beschrieben. Anhand von zwei Betrieben wurden Optimierungsergebnisse und die Umsetzung in der Simulation präsentiert. Es zeigte sich, dass die optimierten Ergebnisse zu einer Reduzierung der warmzuhaltenden Aluminiummenge in den Dosieröfen führt ohne die Ausfälle der Druckgussmaschinen zu erhöhen.

Während mit der Optimierung die Verteilung des Flüssigaluminiums verbessert wurde, zeigte sich ein weiteres Potential bei der Verteilung des festen Aluminiums auf die Schmelzöfen. Hier zeigt sich deutlich eine Abhängigkeit des Schmelzofenfüllstandes zum spezifischen Energieverbrauch. In weiteren Untersuchungen ist geplant, auch diesen Bereich mit einem Optimierungsmodell zu verbessern.

## Literatur

- [1] Schimansky C.: Energiepolitik.  
<http://www.bdguss.de/themen/energie/#.WLAU5PJCMQM>. Letzter Zugriff am 15.09.2020
- [2] Schlüter, W.; Henninger, M.; Buswell, A.; Schmidt, J.: Schwachstellenanalyse und Prozess-verbesserung in Nichteisen-Schmelz- und Druckgussbetrieben durch bidirektionale Kopplung eines Materialflussmodells mit einem Energiemodell. Herausgeber: S. Wenzel und T. Peter, kassel university press, Kassel, S. 19-28, 2017.
- [3] Buswell, A.; Schlüter, W.: E|Melt: Erweiterung einer unternehmensspezifischen Materialfluss- und Energiesimulation zur Abbildung variable Betriebsstrukturen der Nichteisen- Schmelz und Druckgussindustrie. In: Tobias Loose (Hg.): Tagungsband Workshop 2018 ASIM/GI-Fachgruppen. Heilbronn 2018.
- [4] Buswell, A; Schlüter, W.: E|Melt: A flexible material flow and energy simulation in the context of Industry 4.0. ASIM 2018 – 24. Symposium Simulationstechnik. Hamburg, 2018.
- [5] März, L; Krug, W; Rose, O.; Weigert, G.: Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik, Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen. Berlin, 2011.