

Simulative Untersuchung von Aluminium- Druckgussbetrieben anhand von Modellen mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad

Simulative Study of Aluminium die Casting Operations Using Models with Varying Degrees of Detail

Johannes Dettelbacher, Wolfgang Schlüter, Hochschule Ansbach, Ansbach
(Germany), j.dettelbacher@hs-ansbach.de, wolfgang.schlueter@hs-ansbach.de

Abstract: Aluminium die casting plants offer great potential for optimisation in terms of production and energy efficiency, which can be demonstrated by simulations. However, real companies often have a poor data basis for complex simulations. Based on a complex simulation model, simplified simulation models are designed, which are compatible with the low amount of data acquisition. These are described in this paper and tested using different scenarios. One scenario is the variation of downtimes of production machines. It is shown that considerable savings in computing time can be achieved while still achieving plausible results in terms of material and energy consumption.

1 Einleitung

Simulationsgestützte Verfahren werden zunehmend in Produktions- und Logistikbetrieben eingesetzt, um betriebliche Optimierungsmaßnahmen aufzuzeigen (März 2011). Die Simulationsmodelle sollen dabei die realen Betriebe möglichst genau abbilden. Hierfür ist in der Regel ein hoher Detaillierungsgrad notwendig, der jedoch ebenfalls mit hohem Modellierungsaufwand, großem Bedarf an Betriebs- und Produktionsdaten und einer großen Rechenzeit einhergeht. Bei Modellen mit wenig Bedarf an Messdaten und Rechenzeit ergeben sich neue Einsatzgebiete, wie etwa eine modellprädiktive Regelung (MPC). Außerdem ist der Einsatz in Betrieben, welche über einen geringen Datenerfassungsgrad verfügen, möglich. Besonders in der Nichteisen-Industrie zeigt sich, dass die Datengrundlage für die Anwendung eines komplexen Simulationsmodelles oft unzureichend ist. Dabei bieten sich die energieintensiven Betriebe für Simulationen von Optimierungsmaßnahmen oder Vorhersagen über Material- und Energieverbrauch besonders an. Im Rahmen einer Voruntersuchung wurden Simulationsmodelle mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad eines Aluminium-Druckgussbetriebes aufgebaut und unter bestimmten Szenarien miteinander verglichen (Dettelbacher 2019). Das hochdetaillierte

Simulationsmodell wurde anhand von zwei realen Betrieben validiert und kann somit als Referenz für die vereinfachten Modelle dienen. Die Ergebnisse zeigen, dass mit niedrigerem Detaillierungsgrad massiv an Rechenzeit und Umfang der Datenerfassung gespart werden kann. Es kommt jedoch zu Abweichungen bei den Ergebnissen, wie der Ausbringung an verarbeiteter Masse und dem spezifischen Energieverbrauch. Eine Schwäche der Modelle mit niedrigem Detaillierungsgrad liegt in der ausschließlichen Betrachtung der Flüssigaluminiumspeicher. Durch Hinzunahme des Schmelzschachtes mit dem Phasenübergang Fest-Flüssig wird die Abbildungsgüte der Modelle erhöht, ohne Rechenaufwand und den Umfang der benötigten Betriebsdaten maßgeblich zu erhöhen. In der vorliegenden Arbeit wird der betrachtete Schmelz-Druckgussbetrieb sowie die unterschiedlich detaillierten Simulationsmodelle beschrieben. Ausgehend von den Modellen werden verschiedene Betriebszenarien untersucht und die Modelle verglichen.

2 Aluminium-Druckgussbetrieb

Die Grundlage der vorliegenden Untersuchung bildet ein großer Aluminium-Druckgussbetrieb. Der typische Aufbau eines solchen Betriebes ist in Abbildung 1 dargestellt. Der Betriebsablauf beinhaltet sowohl kontinuierliche (z. B. Schmelzen) als auch ereignisdiskrete (z. B. Staplertransport) Prozessschritte.

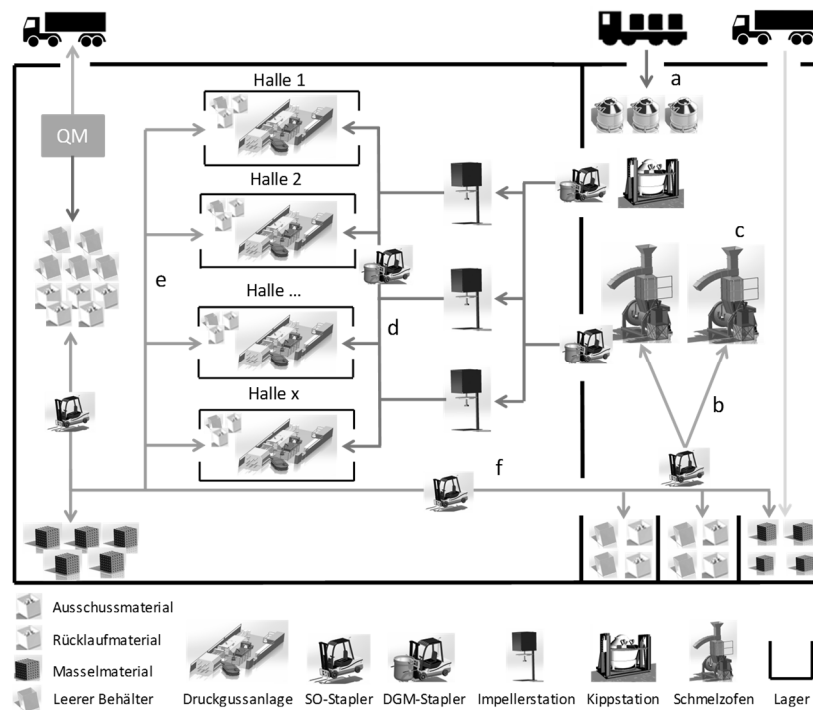


Abbildung 1: Schema eines Aluminium-Druckgussbetriebs mit Prozessschritten (Jeckle 2015)

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)

Der Betrieb kann auf zwei Wegen mit Flüssialuminium versorgt werden. Zum einen werden die Schmelzöfen über Stapler mit festen Aluminium beliefert, in welchen das Aluminium in Form von Masseln, Rücklauf- oder Ausschussmaterial aufgeschmolzen und in der Ofenwanne bis zur Entnahme warmgehalten wird. Alternativ kann das Flüssialuminium aus externen Schmelzereien direkt angeliefert und bis zur Entnahme in einer Kippstation gelagert werden. Die Schmelzöfen müssen pro Schicht einmal freigeschmolzen und gereinigt werden. Die Schmelz- und Warmhaltevorgänge im Schmelzofen sind besonders energieintensive Prozesse und somit maßgeblich für die Energieeffizienz des Betriebes. So benötigen die Schmelzöfen etwa 50 % des betrieblichen Gesamtenergiebedarfs. Deswegen steht bei der Berechnung des Energieverbrauchs der Schmelz- und Warmhalteprozess im Fokus. Dieser wird in einem Energieflussmodell abgebildet. Für den Materialfluss sind hingegen alle Prozessschritte relevant. So wird das flüssige Aluminium nach dem Schmelzprozess aus der Ofenwanne des Schmelzofens entnommen und mit Hilfe von Staplern zu den Druckgussmaschinen gebracht. Die Stapler agieren hierbei nach vordefinierten Regeln: Druckgussmaschinen, die nur noch wenig Flüssialuminium zur Produktion zur Verfügung haben, werden priorisiert beliefert. Bei den Druckgussmaschinen erfolgt die eigentliche Produktion der Teile. Hierbei werden je nach Maschine unterschiedliche Bauteile gegossen, was zu einem maschinenspezifischen Verbrauch an Flüssialuminium führt.

3 Simulationsmodelle

In einer vorherigen Untersuchung wurden vom Detaillierungsgrad unterschiedliche Simulationsmodelle aufgebaut, welche den Aluminium-Druckgussbetrieb aus Abbildung 1 nachbilden (Dettelbacher 2019). Das hochdetaillierte Modell gilt hierbei als Referenzmodell, um die Modelle niedrigerer Detaillierungsgrade zu bewerten. Bei der Weiterentwicklung des vereinfachten und detaillierten Modells wird Wert darauf gelegt, dass die Modelle anhand von hybriden Automaten, welche sowohl kontinuierliche als auch ereignisdiskrete Elemente berücksichtigen, mathematisch beschreibbar bleiben (Atterer 2001). Der Aufbau und die Simulation der Modelle erfolgt mit den Software-Tools MatLab, Simulink und Stateflow.

3.1 Vereinfachtes Modell

Beim vereinfachten Modell (Abb. 2) werden gesamte Maschinengruppen als Flüssialuminiumspeicher betrachtet. Es werden jeweils die Maschinengruppen

Schmelzschächte, Ofenwannen mit Kippstation sowie Druckgussmaschinen zu je einem Materialspeicher zusammengefasst. Der Materialfluss zwischen den Speichern wird über kontinuierliche und ereignisdiskrete Elemente beschrieben. Der Energiefluss wird über die kontinuierliche Größe *Schmelzleistung* bestimmt.

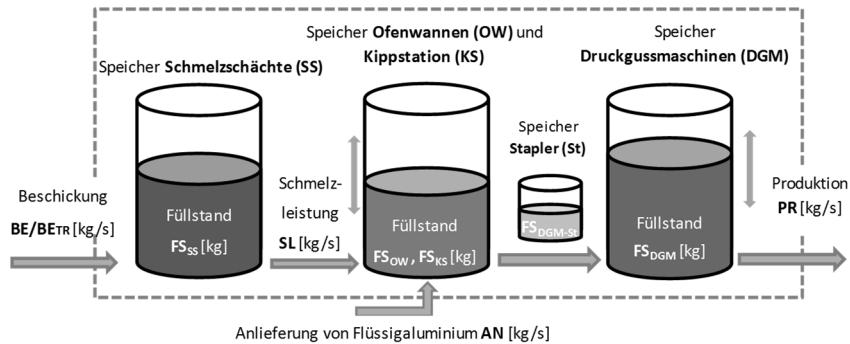


Abbildung 2: Schema des vereinfachten Modells

Die einzelnen Speicher werden als hybride Automaten beschrieben und als solche in Stateflow umgesetzt. Abbildung 3 zeigt beispielhaft den hybriden Automaten, welcher die Schmelzschächte beschreibt. Der Automat besitzt zwei Zustände zwischen denen gewechselt wird und in denen kontinuierliche Prozesse ablaufen. Der Wechsel vom Schmelzen zum Beschicken findet nach einer bestimmten Zeitdauer statt, wenn der Schmelzschacht noch die nötige Kapazität verfügt.

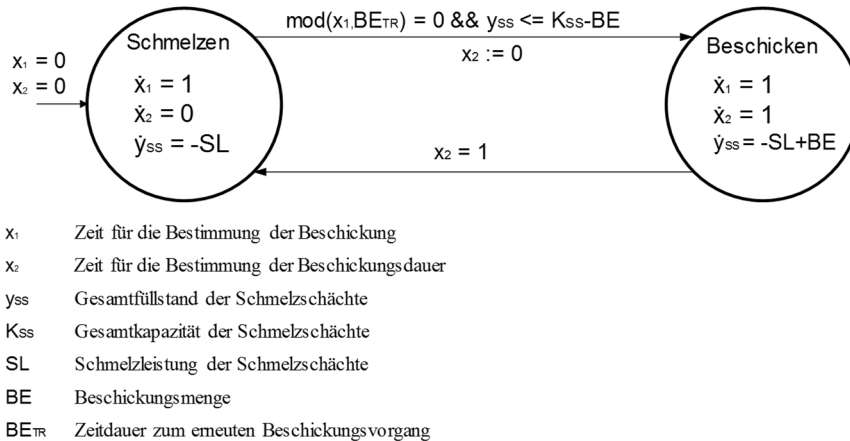


Abbildung 3: hybrider Automat für die Schmelzschächte im vereinfachten Modell

Zu vorherigen Untersuchungen (Dettelbacher 2019) wurde das Modell um den Beschickungsvorgang, die Betrachtung des Schmelzschachtes sowie ein eigenes Energiemodell erweitert. Das Modell zeichnet sich durch geringe Rechenzeit sowie geringe Komplexität aus. Durch das Zusammenfassen der Speicher bedarf es keiner

intelligenten Staplersteuerung. Es können auch keine einzelnen Maschinenausfälle aufgrund von Aluminiummangel abgebildet werden.

3.2 Detailliertes Modell

Im detaillierten Modell (Abb. 4) werden die Maschinen jeweils als separate Materialspeicher betrachtet. Diese separate Betrachtung ermöglicht es, den Aluminiummangel an einzelnen Maschinen abzubilden.

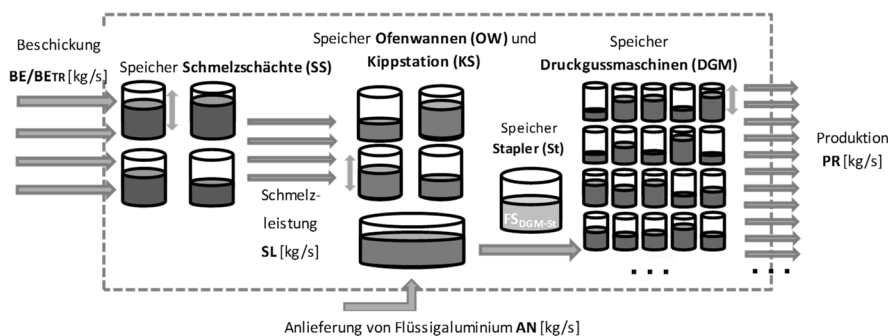
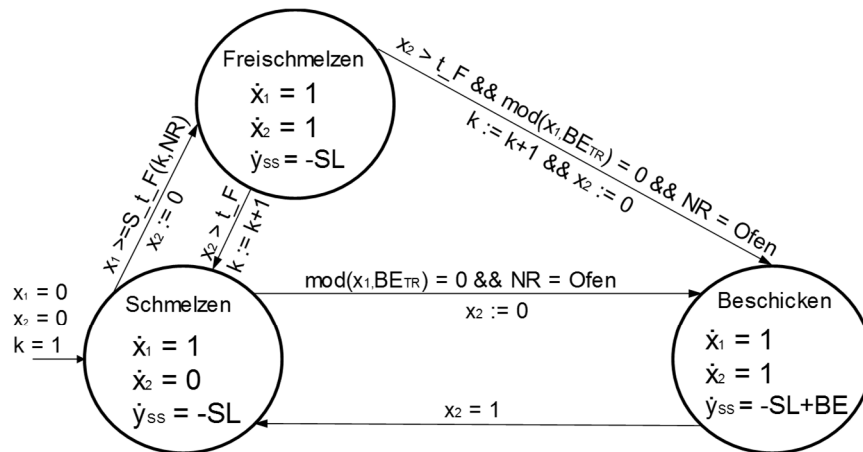


Abbildung 4: Schema des detaillierten Modells

Für die einzelnen Schmelzöfen wird ein individuelles Energiemodell implementiert. Da im detaillierten Modell mehrere Materialquellen und -senken vorhanden sind, bedarf es einer Staplersteuerung, welche vorgibt, aus welcher Materialquelle entnommen und welche Senke beliefert werden muss. Diese Steuerung der Stapler erfolgt über die Füllstände der Maschinen. Die Steuerungslogik gibt vor, dass die Kippstation als Materialquelle priorisiert genutzt wird. Wenn die Kippstation kein Aluminium vorrätig hat, wird aus der Ofenwanne mit dem maximalen Füllstand entnommen. Beliefert wird die Druckgussmaschine mit dem niedrigsten relativen Füllstand. Für die Beschickung der Schmelzschächte ist ebenfalls eine Steuerung implementiert, welche den Schmelzschacht mit dem niedrigsten relativen Füllstand priorisiert. Die Speicher in Abbildung 4 werden ebenso als hybride Automaten umgesetzt. Beispielhaft zeigt Abbildung 5 den hybriden Automaten eines Schmelzschachtes. Dieser besteht aus den Zuständen Freischmelzen, Schmelzen und Beschicken. Die Zustände Schmelzen und Beschicken entsprechen den gleichnamigen Zuständen im vereinfachten Modell. Im Zustand Freischmelzen kann für eine bestimmte Zeitdauer, der Reinigungsdauer des Ofens, dieser nicht beschickt werden. Zusätzlich ist im Automaten eine Steuerung implementiert, die vorgibt, ob ein bestimmter Schmelzschacht beschickt wird. Die Logik ist in ein externes Steuerungsmodul ausgelagert. Das Modell bietet den Vorteil, dass durch die Betrachtung der Beschickungsvorgänge und der einzelnen Schmelzschächte für die Schmelzschächte maschinen- und füllstandabhängige Schmelzleistungen und Energieverbräuche implementiert werden können.



S_t_F	Array mit Freischmelzzeiten
k	Position im Array S_t_F
NR	Nummer des Schmelzofens
t_F	Zeitdauer des Freischmelz- und Reinigungsvorgangs
Ofen	Zu beschickender Ofen (von Steuerung ermittelt)

Abbildung 5: hybrider Automat eines Schmelzschachts im detaillierten Modell

3.3 Hochdetailliertes Modell

Im hochdetaillierten Modell (Abb. 6) werden, bis auf die Lagerhaltung, alle Prozessschritte aus der Abbildung 1 abgebildet. Für die folgende Untersuchung dient das hochdetaillierte Modell als Referenzmodell, da dieses anhand von zwei Betrieben validiert wurde. Ein besonderer Fokus des Simulationsmodells liegt hierbei auf den Schmelzschacht bzw. Schmelzprozess und dem damit verbundenen Energiemodell.

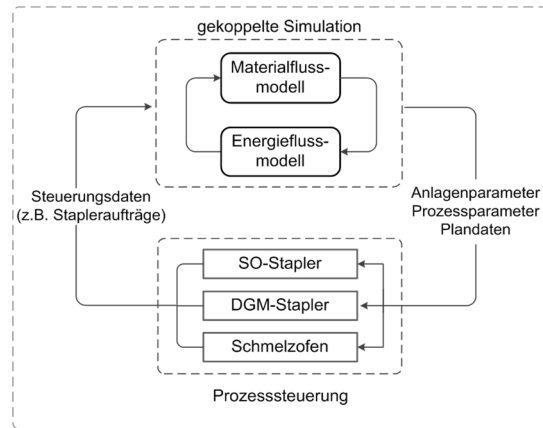


Abbildung 6: Bestandteile der hochdetaillierten Betriebssimulation (Buswell 2018)

Das Materialflussmodell erfasst den kompletten Materialfluss innerhalb des Betriebes, während das Energieflussmodell die thermodynamischen Vorgänge innerhalb der Schmelzöfen erfasst. Die Synchronisierung erfolgt in jeden Zeitschritt mithilfe eines Schnittstellen-Objekts, welches den Austausch der Daten zwischen beiden Modellen realisiert. Für die Steuerung der Betriebsabläufe werden in einem Steuerungsmodul anhand von Anlagen- und Prozessparametern sowie den definierten Steuerungsstrategien Aufträge für die Stapler und die Schmelzöfen erzeugt. Das hochdetaillierte Simulationsmodell umfasst noch weitere Funktionalitäten, wie die Berücksichtigung unterschiedlicher Legierungen und die Abbildung der Impellerstationen. Das Modell wird von Buswell et al. (2018) ausführlich beschrieben.

4 Ergebnisse

Die vereinfachten Modelle werden anhand des hochdetaillierten Modells auf ihre Ergebnisgüte analysiert. Hierbei werden insbesondere Faktoren wie die Ausbringungsmenge der Druckgussmaschinen, die geschmolzene Masse der Schmelzöfen sowie der Energieverbrauch der Schmelzöfen betrachtet. In diesem Kapitel werden verschiedene Anwendungsfälle für die unterschiedlich detaillierten Modelle betrachtet. Für die Simulationen wird ein großer Betrieb mit 4 Schmelzöfen, 31 Druckgussmaschinen und zusätzlicher Anlieferung von Flüssialuminium abgebildet.

4.1 Rechenzeit und Datengrundlage der Modelle

Das primäre Ziel der Modellvereinfachung ist die Einsparung an Rechenzeit und Umfang der notwendigen Datenerfassung. Die Bewertung erfolgt in Tabelle 1.

Tabelle 1: Rechenzeit und Datenumfang der Modelle

	Einfaches Modell	Detailliertes Modell	Hochdetailliertes Modell
Simulationsdauer in Minuten	1	4	132
Benötigte Betriebsparameter	30	157	275

Es zeigt sich, dass durch eine Reduzierung des Detaillierungsgrades eine erhebliche Verringerung der Simulationsdauer realisiert wird. Bei der Verwendung des detaillierten bzw. des vereinfachten Modells sinkt die Rechendauer um das 33 bzw. um das 132-fache. Auch der Datenumfang sinkt mit der Reduzierung des Detaillierungsgrads der Modelle. Die Zahl der benötigten Betriebsparameter reduziert sich im Vergleich zum hochdetaillierten Modell beim detaillierten Modell um 43 %. Beim vereinfachten Modell werden nur noch 11 % der Betriebsparameter benötigt.

4.2 Szenario A: Realer Betriebsablauf

Zum Vergleich der Modelle wird im ersten Schritt der Betrieb ausgehend von den Betriebsdaten einer realen Woche simuliert. Verglichen werden die Simulationen anhand des ermittelten Materialverbrauchs an den Druckgussmaschinen, der geschmolzenen Masse an den Schmelzöfen sowie der spezifischen Energieverbräuche der Schmelzöfen. Der spezifische Energieverbrauch wird über die geschmolzene

Masse und den Gasverbrauch ermittelt. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Vergleich der Modelle

	Vereinfachtes Modell	Detailliertes Modell	Hochdetailliertes Modell
Geschmolzene Masse in t	937	912	920
Gegossene Masse in t	1198	1198	1200
spez. Energieverbrauch in kWh/t	851	968	972

Bei dem Materialverbrauch konnten mit den vereinfachten Modellen die durch die Öfen geschmolzene Masse und die durch die Druckgussmaschinen gegossene Masse gut reproduziert werden. Lediglich bei der geschmolzenen Masse kommt es zu nennenswerten Abweichungen von 1,9 % beim vereinfachten Modell und 0,9 % beim detaillierten Modell. Diese Unterschiede resultieren aus den verschiedenen Beschickungsstrategien innerhalb der Modelle. Beim spezifischen Energieverbrauch zeigen sich beim vereinfachten Modell erhebliche Schwächen. Während das detaillierte Modell mit 0,4 % Abweichung die energetische Lage gut abbildet, weicht das vereinfachte Modell um 12,5 % ab. Die Abweichungen resultieren daraus, dass im Betrieb unterschiedliche Ofentypen verwendet werden, aber das vereinfachte Modell die Öfen in einem Aluminiumspeicher zusammen betrachtet.

4.3 Szenario B: Variation der Ausfallzeiten an den Druckgussmaschinen

Im Szenario B werden die Ausfallzeiten der Druckgussmaschinen variiert. Eine Reduzierung der Ausfallzeiten führt im hochdetaillierten Modell zu einer Effizienzsteigerung der Schmelzöfen, da diese infolgedessen eine höhere Auslastung erhalten. In Rahmen der Studie wird untersucht, ob dieser Effekt auch mit den vereinfachten Modellen abgebildet werden kann. Die Ausfallzeiten wurden im Rahmen der Untersuchung um 50 % bzw. 75 % gesenkt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 dargestellt.

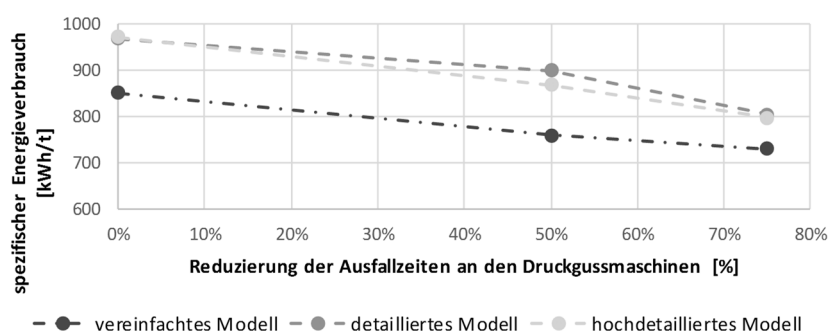


Abbildung 7: spezifischer Energieverbrauch in den Modellen bei Variation der Ausfallzeiten an den Druckgussmaschinen

Es zeigt sich, dass der Effekt von dem vereinfachten sowie dem detaillierten Modell ebenfalls abgebildet werden. Besonders das detaillierte Modell kann den Verlauf des hochdetaillierten Modells wiedergeben. Die Abweichung des vereinfachten Modells resultiert, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, aus der Zusammenfassung der unterschiedlichen Ofentypen zu einem Aluminiumspeicher.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit sind zwei vereinfachte Simulationsmodelle eines bereits bestehenden hochdetaillierten Simulationsmodells erstellt und beschrieben worden. Dabei zeigt sich, dass mit den vereinfachten Modellen massiv an Rechenzeit und benötigten Betriebsdaten gespart werden kann. Bei der Abbildung des Materialverbrauchs und des spezifischen Energieverbrauchs konnten nur geringe Abweichungen zu dem hochdetaillierten Modell beobachtet werden. Lediglich bei dem vereinfachten Modell ergeben sich bei den Energieberechnungen deutliche Abweichungen, da ein einzelner Speicher nicht genügt, um die unterschiedlichen Ofentypen zu beschreiben. Somit eignet sich besonders das detaillierte Modell für den schnellen Einsatz, um Vorhersagen über Energie- sowie Materialverbräuche zu realisieren. Um einen realen Einsatz der Simulationsmodelle zu ermöglichen, werden die Modelle an weiteren realen Szenarien auf ihre Güte getestet und optimiert. Ein angestrebtes Endziel ist der Einsatz der Modelle in Smart Services, wie einer intelligenten Staplersteuerung hin bis zu einer modellprädiktiven Steuerung des Betriebes.

Literaturverzeichnis

- März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G.: Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik, Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen. Berlin, 2011.
- Dettelbacher, J.: Simulative Untersuchung von Betriebserweiterungen in einem Aluminium- Schmelz- und Druckgussbetrieb anhand von Modellen mit unterschiedlichen Detaillierungsgrad. ASIM-Treffen STS/GMMS. Braunschweig, 2019.
- Jeckle, D.: Dokumentation der Software zur Simulation des Materialflusses und Untersuchung der Energieeffizienz eines Schmelz- und Druckgussbetriebes. Studienarbeit Hochschule Ansbach, Fachgebiet Computational Engineering, 2015.
- Atterer, R.: Hybride Automaten. Technische Universität München, 2001.
- Buswell, A.; Schlüter, W.: ElMelt: Erweiterung einer unternehmensspezifischen Materialfluss- und Energiesimulation zur Abbildung variabler Betriebsstrukturen der Nichteisen- Schmelz- und Druckgussindustrie. In: Tobias Loose (Hg.): Tagungsband Workshop 2018 ASIM/GI-Fachgruppen. Heilbronn, 2018.
- Buswell, A.; Schlüter, W.: ElMelt: A flexible material flow and energy simulation in the context of Industry 4.0. ASIM 2018 - 24. Symposium Simulationstechnik. Hamburg, 2018.