

1 Einleitung

1.1 Motivation

Das exponentielle Wachstum der Weltwirtschaft hat in den letzten Jahrzehnten zu einem deutlichen Anstieg des Wettbewerbs um natürliche Rohstoffe, wie z.B. Kohle, Erdöl und Gas, geführt. Dieser wird sich in den nächsten Jahren extrem zuspitzen, wenn man den Studien der Forschergruppe um Donella H. Meadows Glauben schenkt. Mit ihren wiederholt durchgeführten Systemanalysen und Computersimulationen zur Zukunft der Weltwirtschaft [vgl. (Meadows, et al., 1972), (Meadows, et al., 1992) und (Meadows, et al., 2004)] konstatieren sie bei einer Fortführung des „business as usual“ der letzten Jahrzehnte einen Kollaps der Weltwirtschaft bereits ab dem Jahre 2030 [vgl. (Meadows, et al., 2004)]. Den einzigen Ausweg sehen sie dabei in einer industriellen Revolution hin zu einem nachhaltigen Wirtschaften mit den uns zur Verfügung stehenden Ressourcen der Erde [vgl. (Meadows, et al., 1992 S. 222ff)].

Um diese globale Herausforderung der heutigen und kommenden Generationen zu meistern, bedarf es einer Umgestaltung allen bisherigen wirtschaftlichen Handelns auf volkswirtschaftlicher aber vor allem auch auf betriebswirtschaftlicher Ebene.

Ein zentrales Handlungsfeld ist dabei die Abkehr von der energetischen Nutzung fossiler Energieträger. Der Industrie mit ihrer industriellen Wertschöpfung von Gütern kommt dabei eine Schlüsselrolle zu. Dies zeigt auch ein Blick auf die Statistiken. So verbraucht der Industriesektor mit ca. 717 Terrawattstunden im Jahr 2017 selbst im Hochindustrialand Deutschland 28,2 % der Endenergie des Landes [berechnet auf Basis von (BMWi, 2018 S. 5)]. Wobei der Primärenergieverbrauch Deutschlands immer noch zu 80,4 % aus fossilen Energieträgern und zu 6,1 % aus konventionellen Kernbrennstoffen gespeist wird. [berechnet auf Basis von (BMWi, 2018 S. 4)].

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht lösen sowohl die aktuell steigenden, volatilen Energiepreise als auch die staatlichen Anreize und Zwänge einen Handlungsdruck auf Unternehmen aus, sich dem Thema Energie verstärkt anzunehmen.

Produzierenden Betrieben stehen dabei vor allem Maßnahmen im Bereich der Energieerzeugung und -umwandlung sowie im Bereich der Nutzung zur Verfügung. Gerade energieintensive Betriebe, wie die in dieser Arbeit adressierten Aluminiumfeldgießereien, stoßen jedoch bei der Erzeugung von Energie aus regenerativen Quellen bei den aktuell verfügbaren Technologien bspw. mit Photovoltaik rasch an Grenzen. Die effizientere Nutzung von Energie bietet hingegen gerade energieintensiven Betrieben eine Vielzahl an betriebswirtschaftlich lohnenden Möglichkeiten. So können diese Betriebe mit neuen energieeffizienten Technologien und innovativen Ansätzen zur energieeffizienten Prozessführung ihre Energieeffizienz zu steigern.

Die Energieeffizienz der industriellen Wertschöpfung hat sich in den letzten zwei Jahrzehnten zumindest in Deutschland tendenziell stetig verbessert. So reduzierte sich der Energieeinsatz je Bruttoproduktionswert der Industrie zwischen 1991 und 2016 durchschnittlich um jährlich 1,26 %

[vgl. (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V., 2017 S. 4.1)]. Die Möglichkeiten zur Energieeinsparung sind in den meisten Betrieben noch nicht ausgeschöpft.

So existieren sowohl bei Neuplanungen als auch bei der Revitalisierung von Produktionssystemen vor dem Hintergrund anhaltender Weiterentwicklung und neuer Innovationen wirtschaftlich lohnende Energieeinsparpotenziale. Diese lassen sich mit vertretbarem technischen und finanziellen Aufwand erschließen, vor allem bei ohnehin anstehenden Ersatzinvestitionen im Maschinenpark.

1.2 Ausgangssituation und Problemstellung

Beim Planen, Evaluieren und Entwickeln von Energieeffizienzmaßnahmen in einem Produktionssystem ist eine generelle Herausforderung für den Planer, diese hinsichtlich Machbarkeit und Leistung hinreichend genau zu analysieren und zu bewerten.

Bei Energieeffizienzmaßnahmen an einzelnen Anlagen mit keinen oder leicht überschaubaren Auswirkungen auf die eigentlichen Produktions- und Logistikabläufe kann die Machbarkeit und Leistung meist manuell durch den Planer und unter Verwendung analytischer Methoden ermittelt werden. Das betrifft beispielsweise den Austausch ineffizienter Motoren oder das Ausschalten von Maschinen in längeren nicht-produktiven Zeiten, z.B. am Wochenende. Standardisierte Lösungen und Bewertungsansätze, wie diese z.B. in Branchenleitfäden¹ veröffentlicht werden, können hierzu herangezogen werden.

Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz an mehreren verketteten Anlagen hingegen, deren Auswirkungen nicht zu vernachlässigende zeitliche oder systemische Abhängigkeiten aufweisen oder gar prozesszustandsabhängige System- oder Prozessanpassungen voraussetzen, sind bezüglich ihrer Machbarkeit und Leistung auf analytischem Wege kaum mehr zu untersuchen und zu bewerten. Dies trifft vor allem auf temperaturgeführte Produktionsprozesse in Schmelzerei- und Gießereibetrieben zu, bei denen die Produktionsanlagen, sog. Thermoprozessanlagen, wie Industrieöfen stark gekoppelte Energie- und Materialflüsse aufweisen. Aufgrund meist sehr unternehmensspezifisch gewachsener Systeme, liegen hier häufig auch keine Standardlösungen vor. Diese Maßnahmen sind zudem, im Gegensatz zu den eher offensichtlicheren Ansätzen, in der industriellen Praxis kaum genutzt da sie schwerer zu analysieren und ihre Auswirkungen komplexer sind Dennoch lassen sich lohnenswerte Potenziale vermuten.

Die computergestützte Simulation ist hierfür ein Analyse- und Bewertungshilfsmittel, um mit reduziertem Sach- und Zeitaufwand die beschriebenen, komplexen Zusammenhänge zu erfassen und die realen physikalischen Abläufe und Zustände durch ein verhaltensgetreues Modell widerzuspiegeln [vgl. (Wunderlich, 2005 S. 17f)]. Maßnahmen im Modell können zudem probeweise durchgeführt werden, auch wenn diese im realen System zu gefährlich oder zu teuer wären bzw. wenn das System noch nicht existiert. [Vgl. (Nethe, 2006), (Hrdlinczka, et al., 1997), (VDI-Gesellschaft, 2010) und (Wenzel, et al., 2008)]

¹ Der interessierte Leser findet z. B. auf der Internetseite des Bundesverbands der Deutschen Gießereien effguss.bdguss.de den umfassenden Maßnahmenkatalog „Energieeffizienter Gießereibetrieb 2.0“.

Im Rahmen der Digitalen Fabrik hat sich besonders die Materialflusssimulation zum ganzheitlichen Planen, Evaluieren und Verbessern von Produktionssystemen durchgesetzt. Marktverfügbare Lösungen stellen jedoch noch ein lückenhaftes Konzept zur Modellierung und Auswertung des energetischen Verhaltens bereit [vgl. (Schlegel, et al., 2013 S. 187) und (Fuss, et al., 2014 S. 37)]. Dies liegt vermutlich in der Entwicklungsgeschichte der am Markt verfügbaren Softwareangebote begründet. Bisher wurden vor allem Modellbausteine entwickelt und bereitgestellt, die es ermöglichen, das rein logistische Verhalten, also den Fluss von Objekten, wie z.B. Transportmitteln, Materialien, Personal und Aufträge abzubilden. Das energetische Verhalten der Systeme wurde bisher stark vereinfacht abgebildet oder ganz vernachlässigt.

Soll in einer Simulationsstudie nicht nur das logistische, sondern auch das energetische Verhalten eines Produktionssystems abgebildet, analysiert und bewertet werden, fehlen entsprechende generische parametrierbare Modellbausteine, die dem Planer in Grund- oder Erweiterungsbibliotheken der Softwareprogramme zur Verfügung stehen.

Fertige bzw. nur noch gering anzupassende Modelle sind aufgrund der Anlagenkomplexität nicht zielführend, da diese nur einzelne, spezifische Anlagen abbilden. Es fehlt an durchgängig unterstützenden Vorgehensweisen mit denen der Planer oder Betreiber die Modelle für die zu untersuchenden Bereiche selbst aufbauen kann. Letzteres gilt wiederum insbesondere für Thermoprozessanlagen, da diese im Sondermaschinenbau häufig konstruiert, gefertigt und mit spezifischen Anpassungen versehen werden.

Die stetig ansteigende ökonomische Relevanz des Produktionsfaktors Energie im industriellen Herstellprozess fordert jedoch auch in diesem Optimierungsfeld entsprechende Vorgehensweisen und Lösungen, mit deren Hilfe Produktionssysteme zukünftig energieeffizient entworfen, aufgebaut und betrieben werden können.

1.3 Zielsetzung

Gegenstand dieser Arbeit ist die Konzeption einer simulationsgestützten Analyse und Bewertung von Steuerungs- und Regelungsansätzen verketteter Produktionsanlagen in Gießereien unter besonderer Berücksichtigung ihres energetischen Ablaufverhaltens. Hierzu werden Vorgehensweisen zur Modellierung von Anlagen sowie Bausteine zu deren Implementierung in Simulationssoftware entwickelt. Diese sollen Anwender bei der Durchführung von energieintegrierten Simulationsstudien unterstützen, problemadäquate Modellierungsansätze auszuwählen und entsprechende Modelle aufzubauen, weil hierfür noch keine adaptierbaren Modellbausteine in Bibliotheken verfügbar sind.

Betrachtet werden hierbei neben den bisher in marktgängigen Simulatoren modellierten Produktionsanlagen und logistischen Prozessen auch Thermoprozessanlagen. Deren logistisches Ablaufverhalten ist eng mit dem energetischen Ablaufverhalten verknüpft - einerseits über die Materialflüsse und andererseits über anlagenübergreifende Steuerungs- und Regelungsmaßnahmen.

Das für die Gießerei entwickelte Modell dient sowohl dem Studium klassischer Fragestellungen der Produktionsplanung und -steuerung als auch der Energietechnik. Bspw. werden damit

Ansätze zur anlagenübergreifenden Steuerung und Regelung zur Spitzenlastabsenkung eruiert. Im Vordergrund der Forschungsarbeit stehen dabei die Phasen Modellierung und Implementierung im Rahmen einer energieintegrierten Simulationsstudie.

1.4 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Ziel und Zweck der Arbeit ist ein Konzept zur Analyse und Bewertung der Produktions- und Logistikprozesse mittels Simulation und seine beispielhafte Anwendung auf die Aluminiumgießerei der *UNIWHEELS Production (Germany) GmbH*. Die Ausführungen hierzu finden sich in Kapitel 6.

Die Voraussetzungen für die Simulationsstudie in Kapitel 6 werden in den vorausgehenden Kapiteln wie folgt gelegt:

Kapitel 3 untersucht und charakterisiert die in der Forschung und Anwendung vorgefundenen Modellierungs- und Implementierungsansätze, welche die Ressource Energie in den Fokus ihrer Betrachtung stellen. Da diese den Arbeitszielen nicht genügen, werden hierzu notwendige Erweiterungen und Entwicklungen vorgestellt.

Kapitel 4 legt ein schrittweises Vorgehen zur Entscheidung, wie die relevanten Energiegrößen, z.B. die elektrische Leistungsaufnahme, eines betrachteten Systems ausgewählt und adäquat entweder in einem ereignisdiskreten oder zeitdiskreten Modell abgebildet werden können, dar. Zur besseren Einordnung des Vorgehens empfiehlt sich ein Einstieg in Kapitel 6.

Speziell für die ereignisdiskrete Abbildung der Energiegrößen wird das, an unterschiedliche Maschinen- bzw. Anlagenmodelle adaptierbare, und für unterschiedliche Energiegrößen verwendbare Modell, das sogenannte *Energie-Modul*, entwickelt. Dieses wird in Kapitel 5 beschrieben.

Kapitel 2 erläutert die zur Einordnung der Forschung benötigten Grundlagen.

Es folgt die schematische graphische Darstellung von Inhalt und Aufbau:



Abbildung 1: Aufbau der Arbeit im Überblick