

Eignung kombinierter Simulation zur Darstellung energetischer Aspekte in der Produktionssimulation

Anna Carina Römer^{1*}, Martina Rückbrod¹, Steffen Straßburger¹

¹Fachgebiet Wirtschaftsinformatik für Industriebetriebe, Technische Universität Ilmenau, Postfach 100 565, 98684 Ilmenau, Germany; *anna-carina.roemer@tu-ilmenau.de

Abstract. In vielen produzierenden Unternehmen ist Energie ein wesentlicher Kostenfaktor. Energieaspekte werden deshalb in das Entscheidungssystem der Produktionsplanung und -steuerung einbezogen, um die Herstellungskosten zu senken. Die Simulation von Produktionsprozessen erfordert neben der Berücksichtigung technischer und logistischer Produktionsfaktoren auch die Integration von kontinuierlichen Energieverbräuchen. Da Fertigungssysteme im Allgemeinen in diskreten Simulationsmodellen beschrieben werden, könnte ein Ansatz, der die beiden Systemdynamiken kombiniert, vorteilhaft sein. Die kombinierte Simulation nutzt einen kontinuierlichen Simulationsansatz zur Abbildung des Energiebedarfs relevanter Produktionsprozesse und kombiniert diesen mit einem diskreten Simulationsansatz zur Abbildung von Material- und Logistikprozessen. Durch die Zusammenführung der Modelle können die Wechselwirkungen zwischen Materialfluss und Energieverbrauch in der Produktion realitätsnäher simuliert werden.

Einleitung

Ansätze zur kontinuierlichen Verbesserung der Produktionsprozesse mit dem Ziel einer hohen Produktivität bei höchster Produktqualität werden im Unternehmen bisher vor allem produktseitig umgesetzt. Konventionelle Planungsziele, wie etwa Zeit, Kosten, Verfügbarkeit und Qualität, haben einen hohen Stellenwert in der Produktionsplanung und -steuerung erlangt. Auch die Bedeutung der Energie- und Rohstoffmärkte hat in den letzten Jahrzehnten stetig zugenommen. Steigende Preise fossiler Energieträger sowie Debatten über den Klimawandel und endliche Ressourcen führen in der Industrie zu einem Umdenken. Die effiziente Nutzung des Faktors Energie und die konsequente Einbindung von Energieeffizienzzielen in betriebliche Abläufe sind für die Unternehmen zu einer Grundvoraussetzung geworden, um sich nachhaltig wettbewerbsfähig am Markt zu positionieren.

Da sich die Nutzung der Simulation als modellgestütztes Analysewerkzeug bei der Abbildung und Bewertung des dynamischen Verhaltens von Produktionssystemen in der Praxis etabliert hat, ist auch die Betrachtung von Fragestellungen der Energieeffizienz innerhalb der Simulation ein mittlerweile verbreiteter Untersuchungsansatz. Der Großteil existierender Arbeiten hierzu beschränkt sich jedoch zumeist auf die Berücksichtigung der Ressourcenverbräuche anhand wesentlicher messtechnisch erfasster Betriebszustände, die über einen definierten Zeitraum als konstant angesehen werden. Der Energieverbrauch der Ressourcen wird wie in [1] als statusbasiert angenommen und im Rahmen ereignisdiskreter Simulationsansätze (Discrete Event Simulation (DES)) dargestellt und analysiert. Unterschiede liegen in der Art der Implementierung der Energieflüsse, wobei nach [2] und wie in Abbildung 1 dargestellt drei Implementierungsparadigmen auf Basis rein ereignisdiskreter Simulation unterschieden werden können.

Hochdynamische Prozesse eines Produktionssystems, insbesondere im Bereich der energieintensiven Industrien, lassen sich mit solchen quasi-statischen Betriebszuständen nicht ausreichend realitätsnah modellieren. Die Einbeziehung kontinuierlicher Energie-Lastprofile kann mehr Transparenz schaffen. Eine geeignetere und präzisere Simulation energetischer Aspekte von Produktionsprozessen bietet nach [3] deshalb eine Kombination aus diskreter und kontinuierlicher Simulation.

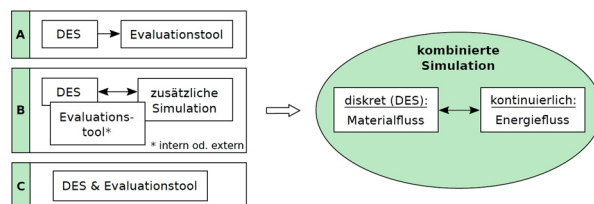


Abbildung 1: Übersicht über mögliche Implementierungsparadigmen zur Energieflusssimulation (in Anlehnung an [2]).

Die Untersuchung der Eignung der kombinierten Simulation zur Darstellung energetischer Aspekte in der Produktionssimulation ist Gegenstand der Masterarbeit [4], deren Ergebnisse in diesem Artikel zusammengefasst werden.

Die kombinierte Simulation ist keineswegs eine neue Methode; es sind Literaturstellen zu Untersuchungen und Praxisanwendungen von sogenannten hybriden oder diskret-kontinuierlichen Systemen bzw. kombinierter Modellierung über mehrere Jahrzehnte hinweg auffindbar, etwa in [5] und [6]. Dennoch hat sich diese Art von Simulation bisher nur geringfügig etabliert und auch der Begriff der hybriden oder kombinierten Simulation ist wie in [7] diskutiert nicht einheitlich definiert, sodass verschiedene Ansätze in der Literatur gefunden werden. Zum einen kann wie in [8] ein Multimethod-Modeling unterstützender Simulator gewählt werden, der die kombinierte Simulation per se durch adäquate Weltansichten und eine interne Verknüpfung ermöglicht, zum anderen besteht die Option, einen diskreten und einen kontinuierlichen Simulator wie in [3] über eine Schnittstelle zu koppeln oder wie in [9] diskrete und kontinuierliche Modelle in einer die hybride Simulation unterstützenden Softwarelösung zu implementieren.

In diesem Paper soll anhand eines Modells gezeigt werden, wie sich die kombinierte Simulation zur Darstellung der energetischen Aspekte in einer Produktionssimulation nutzen lässt und welche Vorteile sie in Abhängigkeit der Leistungscharakteristik der Maschinen im Vergleich zur rein ereignisdiskreten Simulation bringt.

1 Kombinierte Simulation zur Darstellung des Energieflusses

Nicht immer reicht eine rein diskrete oder eine rein kontinuierliche Simulation aus, um den Anforderungen zu simulierender Systeme gerecht zu werden. Nach [10] haben beide Systemdynamiken ihre Grenzen: die diskrete in der ganzheitlichen Betrachtungsweise sowie der dynamischen Abbildung von Systemen und die kontinuierliche Simulation auf dem Level der Details. Zudem weist die DES den Nachteil auf, dass die Komplexität der Modelle mit der Größe des zu simulierenden Systems exponentiell steigt. Die kontinuierliche Simulation positioniert sich auf makroskopischer Ebene und eignet sich durch ihren hohen Abstraktionsgrad nicht zur Abbildung einzelner Individuen oder Entitäten. Darüber hinaus ist

sie im Anwendungsbereich Produktion und Logistik wenig verbreitet. Sie ist deterministisch und enthält keine zufallsbedingten Einflussgrößen.

1.1 Ansätze für die kombinierte Simulation

Die kombinierte Simulation ist – wie der Terminus schon andeutet – eine Kombination aus den genannten zwei kontroversen Systemdynamiken; sie vereint DES mit der kontinuierlichen Simulation. In einigen literarischen Werken wird auch von Discrete Event System and Differential Equation System Specification (DEV&DESS) gesprochen. Dieser Ausdruck nimmt Bezug auf die theoretisch orientierten Formalismen nach [11] und stellt eine von zwei Varianten der kombinierten Simulation dar, wobei für die kombinierte Simulation eine sogenannte Condition Function verwendet wird, die für die Verbindung der diskreten und kontinuierlichen Variablen sorgt. Sobald eine Grenzwertüberschreitung stattfindet, wird diese Funktion aktiviert, wodurch ein bedingtes Ereignis erzeugt und der Systemzustand geändert wird.

Die konträre Variante wird Hybrid State Transition Machine (HSTM) genannt, und verfolgt einen praktischeren Ansatz. Die HSTM beruht auf Zustandsdiagrammen der Unified Modeling Language (UML). Diese bestehen aus Zuständen die durch Transitionen zusammenhängen. Nach [12] funktioniert die kombinierte Simulation so, dass Grenzwerte für die kontinuierlichen Variablen definiert werden und sobald ein solcher überschritten wird, ein diskretes, bedingtes Ereignis (State Event) erzeugt. Dadurch werden eine oder mehrere Transitionen getriggert, die eine Änderung von einem Zustand in den nächsten erlauben und auf diese Weise eine Zustandsänderung des Systems hervorrufen. In Ergänzung dazu kann es vorkommen, dass ein diskretes Ereignis während der Ausführung eine kontinuierliche Variable beeinflusst und dieser ungeachtet der zugrundeliegenden Funktionen neue Werte zuteilt.

1.2 Für die kombinierte Simulation geeignete Simulationssysteme

Simulatoren, die per se für die kombinierte Simulation geeignet sind, müssen in der Lage sein, sowohl eine diskrete als auch eine kontinuierliche Simulation durchzuführen und darüber hinaus beide Simulationsarten miteinander zu verknüpfen. Insbesondere die Verknüpfung trägt dazu bei, dass Wechselwirkungen zwischen den Modellsimulationen erkannt werden und sich die Simulationen gegenseitig beeinflussen können. Schließlich

können diskrete Variablen Veränderungen an kontinuierlichen Variablen hervorrufen und umgekehrt auch kontinuierliche Variablen diskrete Ereignisse erzeugen. Um diese Wechselwirkungen erkennen und ausführen zu können sowie den Zeitfortschritt der Simulation sicherzustellen, ist wie beispielsweise bei [10] ein sogenannter Solver (meist auf der kontinuierlichen Seite) erforderlich, der die Signale des DES-Systems empfängt, Differentialgleichungen löst und intervenieren kann. Ein häufig für die Simulation von Fertigungsbeispielen genutztes Simulationssystem ist Anylogic, das als Multimethod-Modeling-Software die kombinierte Simulation durch Zusammenführung mehrerer auf verschiedenen Weltansichten basierenden Modellen ermöglicht. Insbesondere im wissenschaftlichen Bereich als Multimethod-Modeling-Software eingesetzt und ursprünglich für die kontinuierliche Simulation vorgesehen ist die Software MATLAB/Simulink.

Als konträre Lösung für die kombinierte Simulation können auch mehrere verschiedenartige Simulatoren eingesetzt und beispielsweise über eine TCP/IP-Schnittstelle [3] oder über Standards wie HLA [13,14] miteinander gekoppelt werden. Voraussetzung dabei ist zum einen, dass mindestens ein Simulator DES und mindestens ein zweiter den kontinuierlichen Ansatz unterstützt, um durch Kopplung eine kombinierte Simulation zu erreichen. Zum anderen müssen beide Simulatoren für die Kopplung und die gegenseitige Beeinflussung ausgelegt sein. Es wird auch bei gekoppelten Simulatoren ein Solver benötigt, der den synchronen Zeitfortschritt zwischen den Simulatoren steuert und deren Wechselwirkungen realisiert.

2 Simulationsmodell

2.1 Modellbeschreibung

Um die Eignung der kombinierten Simulation anhand eines Simulationsvergleichs nachzuweisen, wird das nachfolgend beschriebene Modell parallel zur kombinierten Simulationsstudie auch einmal rein ereignisdiskret aufgebaut.

Das herangezogene Beispiel lehnt sich an die Ausarbeitungen von [15] an, der die Energie- und Ressourceneffizienz beim Aluminiumdruckguss untersucht hat. Es werden u. a. der Ablauf sowie die dafür relevanten Maschinen für eine industrielle Aluminiumdruckguss-Wertschöpfungskette beschrieben. Zusätzlich werden die

jeweiligen Energieverbräuche der Maschinen (gemessen mit einem „ChauvinArnaux 8335“) unter Berücksichtigung der Arbeitszyklen dargestellt.

Die Produktionslinie beginnt mit der Druckgusszelle und somit mit einem Warmhalteofen, der die bereits geschmolzenen und flüssigen Aluminium-Legierungen aus der Schmelze empfängt. Der Ofen erhitzt das Aluminium wieder auf 690 °C; währenddessen findet eine permanente Temperaturkontrolle statt. Dann geht der Ofen in den Warmhaltevorgang über. Bei Erreichen der Temperatur schaltet sich der Ofen aus, bei Unterschreitung hingegen beginnt der Heizvorgang erneut.

Zudem fungiert der Warmhalteofen als Puffer; nach dem Heizvorgang und während des Warmhaltens führt er das flüssige Aluminium in dosierten Portionen der Druckgussmaschine in die Druckgusskammer zu, die dann hieraus ein Gehäuse formt. Der entstandene Druckguss wird dann mithilfe einer Stanze aus der Form gelöst. An dieser Stelle wird gleichzeitig ein Abluftsystem betrieben, das die gelösten Materialreste absaugt. Anschließend erfolgt die Fertigstellung der Getriebegehäuse in einer Computerized Numerical Control (CNC)-Maschine, d. h. eine geometrische und funktionale Nachbearbeitung sowie Bohrungen für einsetzbare Schrauben. Eine Sandstrahlmaschine entgratet das Gehäuse und finalisiert es aus materieller Sicht, damit es zur Reinigung zur nachgelagerten Waschmaschine befördert werden kann. Diese besteht aus einem großen mit Waschflüssigkeit gefüllten Becken, durch das die Getriebe geschoben werden. Sie kann vier Gehäuse zeitgleich aufnehmen. Danach durchlaufen die Getriebe eine Dichtigkeitsprüfmaschine, die die defekten Gehäuse aussortiert.

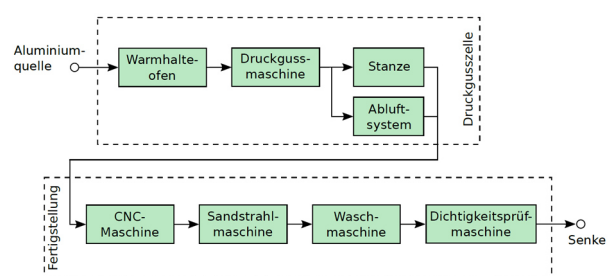


Abbildung 2: Flussdiagramm der Produktionslinie für Aluminium-Getriebegehäuse

Die diskrete Modellierung erfolgt in Anlehnung an das in **Abbildung 2** dargestellte Modell. Die Produktionslinie bildet den Prozess der einzelnen Entitäten ab, da-

bei handelt es sich zunächst um die Aluminium-Legierungen, später um die Getriebegehäuse. Betrachtet wird der Fluss der Entitäten durch das Modell, d. h. durch die einzelnen Maschinenstationen. Der dazugehörige Energieverbrauch wird im kombinierten Modell in System Dynamics (SD) dargestellt. Dabei fungiert ein Stock als Zähler für die Höhe des (Gesamt-)Energieverbrauchs (W_{ges}). Dieser Stock erfährt einen kontinuierlichen Zuwachs aus der Gesamtleistung (P_{ges}) über die Zeit (t) – gemäß der Gleichung (1).

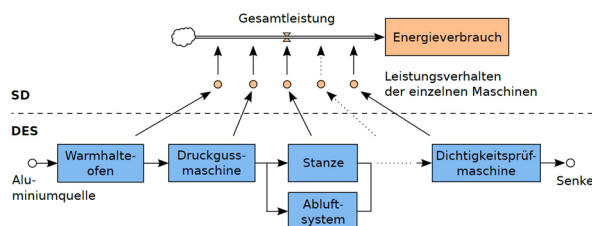


Abbildung 3: Einfluss von DES auf SD nach [15]

Das Ausmaß des Zuwachses/der Gesamtleistung hängt von den summierten Leistungen der einzelnen Maschinen (P_i) ab. Der Buchstabe n sei die Anzahl der Maschinen.

$$W_{ges} = P_{ges} * t; \quad P_{ges} = \sum_{i=1}^n P_i \quad (1)$$

Jede Maschine weist in Abhängigkeit von ihrem jeweiligen Bearbeitungszustand ein unterschiedliches Leistungsverhalten auf. Diese Leistungskurven der einzelnen Maschinen werden in SD modelliert (typischerweise in Form von Funktions- bzw. Differentialgleichungen) und beeinflussen den Fluss der Gesamtleistung; folglich haben die diskret modellierten Maschinen-Objekte jeweils Auswirkungen auf den kontinuierlich modellierten Energieverbrauch.

In der Praxis wird die Leistung oft mit entsprechenden Geräten ermittelt, insofern keine Funktionen für den Maschinentyp vorab vorliegen. Um einen möglichst realistischen Kurvenverlauf zu erhalten, sollte das Messintervall passend zur betrachteten Produktionseinheit und den ausgeführten Prozessen gewählt werden. Ist es zu groß, bleiben eventuell bestehende Leistungsspitzen oder -veränderungen unerkannt. Dies würde die kontinuierliche Kurve verfälschen. Es ist jedoch nicht ratsam, immer so kleine Messintervalle wie möglich durchzuführen, da mit der Häufigkeit der Messung auch der Aufwand, ggf. Speicherplatzbedarf und möglicherweise damit verbundene Kosten steigen.

Da es in SD üblich ist, Funktionsgleichungen zu integrieren, wäre es nun angebracht, aus der Menge an Messwerten bzw. der daraus resultierenden Diagrammkurve eine Funktion aufzustellen, die diesen Verlauf mathematisch widerspiegelt und in die SD-Modellierung eingebettet werden kann. In diesem Beispiel soll jedoch auf eine explizite Funktion verzichtet werden und die Umsetzung im Simulator auf Basis der getakteten Messwerte erfolgen. Der Hauptgrund für den Verzicht liegt in der Komplexität des Musters der Leistungsmesswerte. Die Generierung einer akzeptablen Gleichung, die die Verbräuche realitätsnah abbildet, bringt einen erheblichen Aufwand mit sich, der in der industriellen Praxis unternommen wird. In **Abbildung 4** wird der Unterschied von diskreter und kontinuierlicher Abbildung der Leistungsverläufe einer beliebigen Maschine anhand eines Ausschnittes signifikanter Messwerte in einem kurzen Messintervall gegenübergestellt.

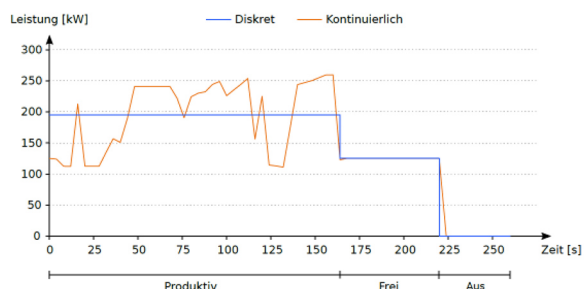


Abbildung 4: Kontinuierlicher Leistungsverlauf auf Basis von Messpunkten

Während in der diskreten Simulation genau ein Durchschnittswert über den gesamten Zeitraum eines Maschinenzustandes verwendet wird, nutzt die kombinierte Simulation eine Menge an Messwerten in festgelegter Auflösung über den Zeitraum eines Zustandes. Somit erfolgt die Abbildung energetischer Aspekte nicht in Abhängigkeit punktueller Zustandsänderungen, sondern zeitabhängig durch eine Tabellenfunktion. Darüber hinaus wird der kontinuierliche Charakter durch die simulative Umsetzung in SD bestätigt, da die Leistungswerte innerhalb SD mittels Parametern aufgezeichnet und so die Gesamtleistung abgebildet wird. Sie enthält somit weder Intervallzeiträume noch ist sie sprunghaft.

2.2 Modellimplementierung

Für die kombinierte Simulation wird ein Multimethod-

Modeling unterstützendes Simulationssystem herangezogen, um die Vorteile in nur einer alleinigen Applikation ohne Kopplung oder Verbindung mit anderen Simulatoren nutzen zu können. Zur Auswahl seien MATLAB/Simulink und AnyLogic gestellt; da MATLAB/Simulink zwar die kombinierte Simulation ermöglicht, jedoch für eine adäquate Nutzung von DES zusätzliche Module empfiehlt, erfolgt die Modellimplementierung in AnyLogic.

Die Modellierung der Leistungskurven einzelner Maschinen erfolgt typischerweise in Form von Funktions- bzw. Differentialgleichungen. Liegt keine Funktion für den Maschinentyp vor, lässt sich die Leistung oft mit entsprechenden Messgeräten erfassen und über eine Tabellenfunktion in einem realistischen Kurvenverlauf darstellen. Um die von den Maschinen benötigte elektrische Energie zu modellieren, greift AnyLogic auf die in Excel vorbereiteten Daten zu. Es werden zusätzlich Events benötigt, die von den diskreten Maschinenobjekten in Abhängigkeit von deren Bearbeitungszustand getriggert werden. Diese Ereignisse wiederholen sich im für die jeweilige Maschine erforderlichen Messintervall der gesammelten Daten, lesen den Leistungswert zum passenden Zeitpunkt aus und aktualisieren den Maschinenparameter. Gestoppt werden sie letztlich durch den Zustandswechsel der Maschinen bzw. durch das Triggern eines anderen Ereignisses zum Auslesen neuer Leistungswerte. Die Events sind die Verbindung zwischen der diskreten und der kontinuierlichen Modellierung: getriggert im DES-Modell beeinflussen sie die sich im SD-Modell befindlichen Maschinenparameter. In SD ergeben alle Maschinenparameter zusammen die Gesamtleistung zu jedem möglichen Zeitpunkt. Diese wird durch einen Fluss repräsentiert, der den Wert dieser Gesamtleistung kontinuierlich über die Laufzeit aufzeichnet und die Berechnung des Energieverbrauchs im Stock ermöglicht. Mit geeigneten Statistik-Objekten und Datasets werden diese Maschinenparameter analysiert und ergebnisorientiert ausgewertet.

3 Simulationsergebnisse

Die Output-Analyse der kombinierten Simulation erfolgt anhand ausgewählter Vergleichskriterien zur parallel durchgeführten rein ereignisdiskreten Simulationsstudie.

3.1 Datenbeschaffungsaufwand und Simulationslaufzeiten

Bei der Modellerstellung fällt auf, dass der Datenbeschaffungsaufwand für die kontinuierlichen Energie-Lastprofile durch die Bestimmung der idealen Messintervalle zur Rekonstruktion der realen Verbrauchsverläufe vergleichsweise hoch ist. Ebenso sind der Programmieraufwand sowie die Modellkomplexität bei der kombinierten Simulation durch eine zusätzliche Weltsicht deutlich höher. Hierdurch steigt – unabhängig von gekoppelten oder Multimethod-Modeling-Systemen – der Programmieraufwand.

Beim Blick auf die Laufzeiten der Simulation fällt auf, dass die kombinierte Simulation durchschnittlich dreimal länger benötigt als die diskrete Simulation des gleichen Modells. Die Ursache liegt darin, dass die kombinierte Simulation in ihrer Implementierung aufwendiger und umfangreicher ist sowie einen kontinuierlichen Teil in SD beinhaltet. Dies erhöht sowohl die Modellkomplexität als auch den Rechenaufwand bei der Ausführung.

3.2 Vergleich des Leistungsverlaufs

Aufgrund der über einen Maschinenzustand konstanten und gemittelten Leistungswerte weist der Leistungsverlauf bei einer rein diskreten Modellierung weniger stark ausgeprägte Extremwerte und auch eine weniger volatile Kurve auf (Abbildung 5). In kombinierter Simulation wird dieser Verlauf feiner modelliert. Hieraus lassen sich die Leistungsspitzen sowohl zeitlich als auch in ihrem Ausmaß genauer bestimmen. Diese Peaks sind evidenter und führen zu einer wahrheitsgetreueren Darstellung des Leistungsverlaufs.

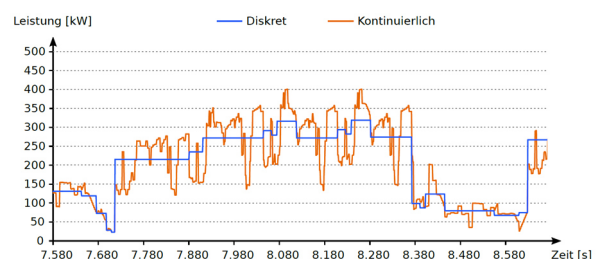


Abbildung 5: Vergleich des diskret und kontinuierlich dargestellten Leistungsverlaufs

Die Leistung ist, wenn sie beim Simulationszweck im Vordergrund steht, ein ausschlaggebendes Kriterium für den Einsatz der kombinierten Simulation. Ein passender

Anwendungsfall aus der Produktion ist der Fokus auf die Extremwerte und die Analyse der Maschineneinzelleistung/Gesamtleistung. Die kombinierte Simulation erlaubt an dieser Stelle die bessere Gestaltung der Produktionslinie mit dem Ziel, Peaks und besonders hohe Leistungsbeanspruchungen zu identifizieren.

Vergleicht man die durchschnittliche Leistung der Energieverläufe der diskreten und kombinierten Simulation, ähneln sich die Werte. Dies ist nicht weiter verwunderlich, da die diskreten, über einen Zustand konstanten Leistungswerte aus der Mittelwertbildung über die kontinuierlichen Leistungswerte resultieren.

Grundlegend ergibt sich aus den theoretischen Erkenntnissen, dass die kombinierte Simulation als wahrheitsgetreuer und vorteilhafter für die Abbildung von Energieaspekten gilt. Aus eigener Analyse ist jedoch zu konstatieren, dass diese Aussage nicht ohne Weiteres verallgemeinert werden kann; die bessere Eignung der kombinierten Simulation gegenüber einer rein diskreten Simulation fußt auf zwei entscheidenden Gesichtspunkten: dem Simulationszweck sowie der Ressourcenverfügbarkeit. Führt man eine Sensitivitätsanalyse durch und zerlegt das Simulationsmodell in zwei Varianten, einmal in die Maschinen mit relativ konstantem Leistungsverlauf und einmal in die Maschinen mit leistungsvariablem Verlauf, so wird deutlich, dass die kombinierte Simulation nicht in jedem Anwendungsfall die zu bevorzugenden Lösung darstellt.

3.3 Sensitivitätsanalyse

Der Leistungsverlauf des Abluftsystems, der Sandstrahlmaschine sowie der Waschmaschine weist jeweils nur geringe Abweichungen zwischen diskreter und kombinierter Simulation auf. Dies ist auf einen wenig volatilen Verlauf in der kombinierten Simulation zurückzuführen, der sich dem diskreten, über die Maschinenzustände konstanten Verlauf approximiert.

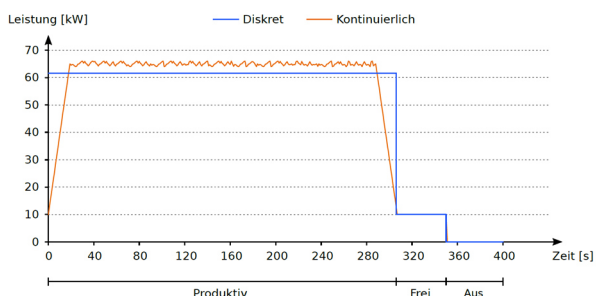


Abbildung 6: Energie-Lastprofil einer Waschmaschine

Diese Maschinen werden im Folgenden als leistungs-konstante Maschinen bezeichnet (**Abbildung 6**).

Die Druckgussmaschine, die Stanze, die CNC-Maschine sowie die Dichtigkeitsprüfmaschine werden als leistungsvariabel bezeichnet, da der Leistungsverlauf in kombinierter Simulation sehr volatil ist und somit erhebliche Abweichungen zum diskreten Leistungsverlauf bestehen (**Abbildung 7**).

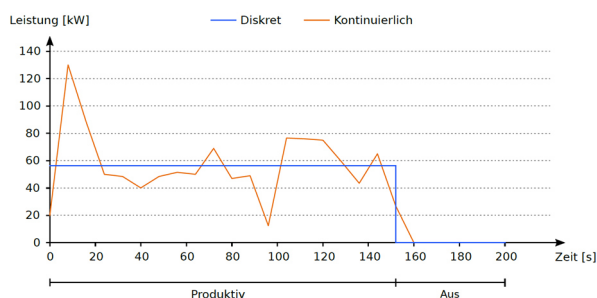


Abbildung 7: Energie-Lastprofil einer CNC-Maschine

In den nachfolgenden zwei Abbildungen ist der Kontrast der beiden Modellteile mit Blick auf die Gesamtleistung illustriert. Die Diagramme zeigen jeweils einen Ausschnitt über genau ein Muster, das sich im Simulationsdurchlauf periodisch wiederholt.

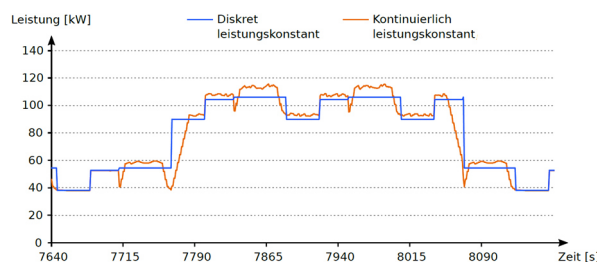


Abbildung 8: Vergleich des Leistungsverlaufs - Szenario leistungskonstante Maschinen

Die **Abbildung 8** veranschaulicht – unter der Bedingung, dass sich die Produktionslinie aus nur leistungs-konstanten Maschinen zusammensetzt – die Similarität zwischen der diskreten und der kombinierten Simulation. Trotz der offenkundig präziseren Leistungsdarstellung über die Zeit in der kombinierten Simulation, beschreiben beide Kurvenverläufe stets ein gemeinsames Leistungsniveau. Im Gegensatz dazu weichen die Kurvenverläufe in der **Abbildung 9** bei einer Produktionslinie, die aus leistungsvariablen Maschinen besteht, signifikant voneinander ab und stellen ein kontrastreiches Muster dar.

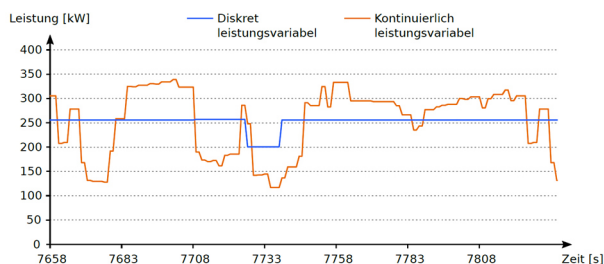


Abbildung 9: Vergleich des Leistungsverlaufs - Szenario leistungsvariable Maschinen

Die Entscheidung für oder gegen die kombinierte Simulation hängt zum großen Teil von der Maschinenzusammenstellung in der Produktionslinie ab. Besteht die Produktionslinie hauptsächlich aus Maschinen, die während des Betriebs eine verhältnismäßig konstante Leistung aufweisen, so ist eine kombinierte Simulation nicht zwingend erforderlich, da sich die Messwerte der energetischen Kennzahlen ähneln bzw. teilweise gleichen. Für eine äußerst detailgetreue Nachbildung der Produktionslinie und für eine gezielte Fokussierung des Leistungsverlaufs (bspw. bei der Analyse der Peaks) eignet sich die kombinierte Simulation dennoch besser, um Unterschätzungen zu vermeiden. Sind in der Produktionslinie Maschinen integriert, die eine variable Leistung aufweisen (auch neben leistungskonstanten Maschinen), ist dies ein Indiz für den Einsatz der kombinierten Simulation, um die reale Maschinencharakteristik adäquat nachstellen zu können.

3.4 Eignungsfeststellung der kombinierten Simulation

Der Verlauf der kumulierten Gesamtenergie ist in der kombinierten Simulation besser abbildbar, insofern sich leistungsvariable Maschinen in der Produktionslinie befinden. Jedoch wird auch hier im Ergebnis der gleiche Gesamtenergieverbrauch errechnet. Wesentlicher Mehrwert ist jedoch, dass sich Extremwerte, wie die minimale oder maximale Verbrauchsleistung, in der kombinierten Simulation exakter darstellen und bestimmen lassen. Handelt es sich lediglich um leistungskonstante Maschinen, kann auch hierfür ggf. schon die DES ein für den Zweck der Simulation hinreichend genaues Ergebnis liefern.

Die bessere Eignung der kombinierten Simulation hängt damit von drei Faktoren ab:

1. Ressourcenverfügbarkeit (zeitlich, personell sowie technisch im Hinblick auf Rechengeschwindigkeit,

Speicher, Energie- und Leistungsmessgeräte, Datenverfügbarkeit, u.Ä.)

2. Maschinenkonstellation in der Produktionslinie sowie der Leistungscharakteristik der Maschinen
3. Simulationszweck (Ziele und erstrebte Messwerte: Leistungs-/Peak-Analyse vs. Durchschnittswerte oder kumulierter Gesamtenergieverbrauch).

Unter der Annahme, dass in der heutigen Zeit sowohl Rechnerkapazitäten, als auch benötigte Messgeräte auf verschiedenste Art und Weise verfügbar sind und zudem oft eine Lösung für den personellen und zeitlichen Aufwand geschaffen werden kann, führt die Ressourcenverfügbarkeit alleine in der Regel nicht zu einer Entscheidung gegen den Einsatz der kombinierten Simulation. Des Weiteren besteht kaum eine Produktionslinie in der industriellen Praxis lediglich aus leistungskonstanten Maschinen. Aus dieser Perspektive kristallisiert sich im Endeffekt eine deutliche Tendenz zur besseren Eignung der kombinierten Simulation heraus, die lediglich vom Simulationszweck und den Zielsetzungen abhängt.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Verknüpfung von Material- und Energieflusssimulation ist ein aktueller Forschungsgegenstand. In rein diskreter Simulation bedingt dies die Definition von zustandsbasierten und über einen Zeitraum konstanten Maschinen- sowie parallelen Energiezuständen. Diese Abbildung der Energieverbräuche ist jedoch häufig nicht angemessen exakt. Aus Gründen der präziseren Abbildung der Energie bei einer ihrer Charakteristik entsprechenden kontinuierlichen Modellierung ist die kombinierte Simulation für die Verknüpfung von Materialfluss in DES und Energiefluss in SD ein neuer Lösungsansatz. Die kombinierte Simulation umfasst sowohl einen diskret als auch einen kontinuierlich umgesetzten Modellteil; sie führt beide Systemdynamiken zusammen, sodass sich die Vorteile ergänzen. Es alternieren jeweils eine diskrete (mit Ereignisausführung und Zustandsänderung) und eine kontinuierliche Phase (Berechnungen und Zeitfortschritt). Auf diese Weise sind interdependente Wechselwirkungen untereinander möglich, die eine Kommunikation zwischen dem diskreten und dem kontinuierlichen Modell erlauben. Insbesondere in Einsatzfällen, wo in der Realität starke Wechselwirkungen zwischen dem diskret modellierten Teil des Produktionssystems und dem kontinuierlich abgebildeten Energieverbrauch existieren,

erscheint eine kombinierte Simulation daher zielführend zu sein. Weitere Forschungsaktivitäten sind jedoch notwendig, um aus den in der Praxis häufig erfassten Messwerten von Energieverbräuchen adäquate Funktionsgleichungen zur Modellierung in SD zu erstellen. Die Herausforderung besteht hier nicht nur im geeigneten Fitting der Gleichungen, sondern in der Modellierung der ggf. vorhandenen Wechselwirkungen zwischen Zustand des diskreten Modells und der gemessenen Energieverbräuche.

Zusätzliche Erweiterungen des konkreten Beispiels könnten in der Nutzung von zufallsbedingten Verteilungsfunktionen anstelle der festen Maschinenbearbeitungszeiten bestehen; so würde es möglich, Replikationen durchzuführen und auch stochastische Einflüsse in diesem Kontext zu untersuchen. Limitationen bestehen dann allerdings wieder in der Frage, wie hierbei mit den real vorliegenden Messwerten umzugehen ist, die sich auf eine deterministische Bearbeitungsdauer beziehen. Im vorliegenden Modell wurde lediglich die elektrische Energie betrachtet. Zur Erfüllung der Ganzheitlichkeit könnte die Betrachtung anderer Energieformen und peripherer energetischer Anforderungen (z. B. der Beleuchtung) hinzugezogen werden. Auch die maschinelle Erweiterung bzw. Modifizierung des hier verwendeten Modells oder die Wahl eines alternativen Simulators können ggf. weiterführende Erkenntnisse nach sich ziehen.

Die kombinierte Simulation zur Darstellung energetischer Aspekte stellt aktuell und voraussichtlich auch in den nächsten Jahren einen umfassenden Forschungsgegenstand dar, der zukünftig eine noch zentralere Rolle in der Simulation von Produktionssystemen einnehmen wird, da er für die industrielle Praxis höchst relevant ist.

References

- [1] Haag H. *Eine Methodik zur modellbasierten Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion* [dissertation]. Universität Stuttgart; 2013.
- [2] Thiede S. *Energy Efficiency in Manufacturing Systems* [dissertation]. TU Braunschweig; 2012. doi: 10.1007/978-3-642-25914-2.
- [3] Peter T, Wenzel S. Simulationsgestützte Planung und Bewertung der Energieeffizienz für Produktionssysteme in der Automobilindustrie. In Rabe M, Clausen U, editors. *Simulation in Production and Logistics*; 2015 Sep. 16. *ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik*; 2015; Dortmund. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. pp. 535-544.
- [4] Rückbrod M. *Eignung kombinierter Simulation für die Abbildung energetischer Aspekte in der Simulation von Produktionssystemen* [master thesis]. Technische Universität Ilmenau; 2018.
- [5] Pritsker A. A Panel On Combined Modeling. In Gantz D, Blais G, Solomon S, editors. *Proceedings of the 1985 Winter Simulation Conference; 17th Winter Simulation Conference*, 1985 Dec; San Francisco. pp. 111-112.
- [6] Schwarz P. Simulation of systems with dynamically varying model structure. *Mathematics and Computers in Simulation*. 2008; Vol. 79: pp. 850-863.
- [7] Mustafee N, Brailsford S, Djanatliev A, Eldabi T, Kunc M, Tolk A. Purpose and Benefits of Hybrid Simulation: Contributing to the Convergence of its Definition. In Chan W, D'Ambrogio A, Zacharewicz G, Mustafee N, Wainer G, Page E, editors. *Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference; 50th Winter Simulation Conference*, 2017 Dec; Las Vegas. Piscataway, NJ: IEEE. pp. 1631-1645.
- [8] Pawletta T, Schmidt A, Junglas P. A Multimodeling Approach for the Simulation of Energy Consumption in Manufacturing. *Simulation Notes Europe*. 2017; 2: pp. 115-124. doi: 10.11128/sne.27.tn.10377
- [9] Schlüter W, Henninger M, Buswell A, Schmidt J. 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. In: Wenzel S, Peter T editors. *Simulation in Produktion und Logistik 2017. 17. ASIM-Fachtagung*; 2017 Sep; Kassel. Kassel: kassel university press GmbH. pp. 19-28.
- [10] Helal M, Rabelo, L, Sepúlveda J, Jones A. A methodology for Integrating and Synchronizing the System Dynamics and Discrete Event Simulation Paradigms. In: Sterman J, editor. *Proceedings of the 25th International Conference of the System Dynamics Society. 25th International Conference of the Systems Dynamics Society*; 2007 July; Boston. pp. 1-24.
- [11] Zeigler BP, Kim TG, Prähofer H. *Theory of Modelling and Simulation*. San Diego: Acad. Press, 2nd ed., 2000, 510 p.
- [12] Maler O, Manna Z, Pnueli, A. From Timed To Hybrid Systems. In: de Bakker JW, Huizing C, de Roever WP, Rozenberg G., editors: *Proceedings of the Real-Time: Theory in Practice. REX Workshop*; 1991 June; Mook. London: Springer-Verlag. pp. 447-484.
- [13] Lantzsich G, Straßburger S, Urban C *HLA-basierte Kopplung der Simulationssysteme Simplex III und SLX*. In: *Proceedings Simulation und Visualisierung '99*, eds. O.Deussen, V. Hinz, P. Lorenz. Magdeburg, March 4.-5. 1999, SCS International, pp. 153-166.
- [14] Straßburger S, Schulze T, Lantzsich G. *Simplex 3 und SLX - gemeinsam unter HLA*. *Proceedings of the 13th Simulation Symposium ASIM 99*. September 21-24, 1999. Weimar, Germany.
- [15] Heinemann T. *Energy and Resource Efficiency in Aluminium Die Casting*. Heidelberg: Springer Verlag; 2016. p. XXVI, 242.