

*Simulation in Produktion
und Logistik 2017*
Sigrid Wenzel & Tim Peter (Hrsg.)
kassel university press, Kassel 2017

Betrachtungen energetischer Einflussfaktoren in der Simulation in Produktion und Logistik: Eine Literaturanalyse

Considering Energetic Influences in the Simulation of Production and Logistics: a Literature Review

Sigrid Wenzel, Tim Peter, Universität Kassel, Kassel (Germany),
s.wenzel@uni-kassel.de, tim.peter@uni-kassel.de

Johannes Stoldt, Andreas Schlegel, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und
Umformtechnik IWU, Chemnitz (Germany), johannes.stoldt@iwu.fraunhofer.de,
andreas.schlegel@iwu.fraunhofer.de

Guido Groß, Siemens Industry Software GmbH, Stuttgart (Germany),
guido.gross@siemens.com

Holger Pitsch, INCONTROL Simulation Solutions, Wiesbaden (Germany),
holger.pitsch@incontrolsim.com

Markus Rabe, TU Dortmund, Dortmund (Germany), markus.rabe@tu-dortmund.de

Marco Seewaldt, TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld (Germany),
mse@imab.tu-clausthal.de

Abstract: In recent years, an increasing consideration of environmental impacts in simulation studies in production and logistics can be observed. This is partially motivated by the climate change, but also by economic interests of companies. Thus, many simulation solutions exist, but still no standardization for the execution of simulations considering energetic influences has been established. The ASIM working group “Consideration of Energetic Parameters in Simulation in Production and Logistics” commenced an extensive methodical literature review to document the state-of-the-art in this sector. This paper presents both the methodical approach and the first result of the analysis, the so-called research map. Furthermore, selected samples are presented, describing simulation studies and solutions throughout the value chain. Concluding, an outlook on the next steps of the working group in creating an internationally adhered survey as a basis for standardization is given.

1 Motivation und Zielstellung

Seit Mitte der 2000er Jahre erfährt die Betrachtung von Umweltwirkungen in der Simulation von Produktions- und Logistiksystemen und -prozessen immer größere

Bedeutung. Dies ist auf verschiedene marktwirtschaftliche und politische Einflüsse zurückzuführen. Müller et al. (2009) nennen dazu als unternehmensexterne Treiber „steigende Energiepreise, wachsende Energienachfrage, sinkende Energiereserven und Versorgungssicherheit, nachgewiesene Umweltbelastung aus Energieerzeugung und -nutzung sowie Restriktionen der Politik“ (Müller et al. 2009, S. 6). Letztere entstammen vor allem dem wachsenden gesellschaftlichen Konsens, dass der Klimawandel infolge menscheninduzierter Treibhausgase verlangsamt, wenn nicht aufgehalten werden muss. Trotz unterschiedlicher internationaler, europäischer und nationaler Abkommen oder Verträge zeigt sich jedoch, dass für Unternehmen wirtschaftlicher Erfolg bisweilen der größte interne Treiber ist. Dabei ist festzustellen, dass insbesondere im Bereich der industriellen Produktion kaum restriktive Gesetze zur Verringerung von Umweltwirkungen bestehen (Bauernhansl 2014, S. 19 ff.). So wird in Deutschland zumeist aus politischer Sicht nach den Grundsätzen „Fordern – Fördern – Informieren“ (Bauernhansl 2014, S. 21) gehandelt.

Umso wichtiger ist es für Produktions- und Logistikunternehmen, etwaige Effizienzmaßnahmen, aber auch ihre eigenen Operationen, hinsichtlich der Leistungsfähigkeit zu prüfen. Die Simulation stellt dabei ein zentrales Werkzeug zur Untersuchung auch sehr komplexer Zusammenhänge zwischen produktionslogistischen Abläufen und den peripheren Energie- und Medienversorgungssystemen in Unternehmen dar. Ein großer Vorteil gegenüber statischen Verfahren liegt insbesondere in der Möglichkeit, dynamische Wechselwirkungen und stochastische Einflüsse zu berücksichtigen: eine Grundvoraussetzung für eine gesicherte Planung (vgl. Rabe et al. 2008; Wenzel et al. 2008). Der wissenschaftliche Diskurs der vergangenen Jahre bestätigt diese Bedeutung. Zugleich ist festzustellen, dass trotz der Vielzahl und Vielfältigkeit dokumentierter Simulationslösungen für diesen Bereich (vgl. auch Literaturanalysen in Thiede 2012; Andersson et al. 2012; Thiede et al. 2013; Sproedt et al. 2015; Roemer und Strassburger 2016) bisweilen noch keine Standardisierung für die Durchführung derartiger simulationsgestützter Untersuchungen erfolgt ist.

Unter diesem Eindruck wurde 2014 innerhalb der ASIM-Fachgruppe „Simulation in Produktion und Logistik (SPL)“ die Arbeitsgruppe „Berücksichtigung energetischer Einflussfaktoren in SPL“ gegründet. Diese nähert sich der Erfassung des tatsächlichen Bedarfs durch eine umfassende Analyse des bisherigen Standes von Wissenschaft und Technik in Form einer Forschungslandkarte.

Dieser Beitrag stellt ausgewählte Ergebnisse der Literaturanalyse vor. Nach kurzer Erläuterung des methodischen Vorgehens im zweiten Abschnitt erfolgt zunächst eine geographische Einordnung bestehender Forschungsarbeiten (Abschnitt 3). Daran schließt sich eine Übersicht über Branchen, die sich mit energetischen Fragestellungen in der simulationsgestützten Planung beschäftigen, an (Abschnitt 4). Eine ausführlichere Darstellung der Forschungsaktivitäten wird beispielhaft entlang der Wertschöpfungskette in Abschnitt 5 durchgeführt. Ein Fazit und Ausblick erläutern die weitere Verwendung der Landkarte für zukünftige Aufgaben der Arbeitsgruppe.

2 Methodisches Vorgehen zur Landkartenerstellung

Im Vordergrund der Analyse des bisherigen Standes von Wissenschaft und Technik steht die Entwicklung einer thematischen Landkarte zum Einsatz der Simulation bei der Betrachtung energetischer Einflussfaktoren in Produktion und Logistik. Hierzu

werden mittels einer Literaturanalyse Forschungsarbeiten und Publikationen identifiziert, die Simulationsfragestellungen aus den Bereichen Produktion und Logistik mit Bezug zur Abbildung von Energieflüssen behandeln. Zur Einordnung der in den jeweiligen Publikationen beschriebenen Modelle und Anwendungen hat die Arbeitsgruppe die folgenden 11 Kategorien erarbeitet:

1. Einsatzziele und Zwecke der Simulationen mit energetischem Kontext
2. Fokus im Systemlebenszyklus
3. Fokus in der Wertschöpfungskette
4. Fertigungsstruktur
5. Fertigungsart
6. Branche
7. Detaillierungsgrad zur Modellierung
8. Gewählter Architekturansatz zur Simulation von Material-/Energieflüssen
9. Eingesetzte Simulationswerkzeuge
10. Eingangsdaten- bzw. Informationskategorien für die Energiebetrachtung
11. Kennzahlen aus der Simulation im Hinblick auf energetischer Aspekte

Jeder Kategorie sind konkrete inhaltliche Ausprägungen zugeordnet. So umfasst beispielsweise die Kategorie 8 „Gewählter Architekturansatz zur Simulation von Material-/Energieflüssen“ als Ausprägungen die Integration der Energiebewertung in ein ereignisdiskretes Modell, die ereignisdiskrete Simulation mit nachgelagerter (Excel-basierter) Auswertung, zwei getrennte Simulationsmodelle für Energie und Produktion in zwei Werkzeugen ohne Kopplung, mit Offline-Kopplung (zur Datenübertragung) oder online gekoppelt, ein Werkzeug mit zwei Simulationsmethoden in einem Modell oder eine rein kontinuierliche Simulation.

Mit der Zuordnung einer Publikation zu einer oder mehreren Ausprägungen der einzelnen Kategorien entsteht ein umfassender Überblick über die aktuellen Forschungen in diesem Themenfeld. Zudem können Forschungslücken identifiziert werden, wenn einer Ausprägung einer Kategorie keine Literaturstelle zuzuordnen ist. Diese können dann in zukünftigen Projekten gezielt adressiert werden.

3 Geographische Einordnung der Arbeiten

Zur Strukturierung der analysierten Publikationen wird zunächst ermittelt, wie sich die in dem Themenfeld forschenden Institutionen über die Welt verteilen. Hierzu werden die Standorte der publizierenden Institutionen auf einer Karte dargestellt. Wenn Personen aus unterschiedlichen Einrichtungen an einer Publikation beteiligt sind, wird nur der Standort des Erstautors der Publikation visualisiert. Des Weiteren beinhaltet die resultierende Grafik keine Aussage über die Anzahl der Publikationen einer Einrichtung oder über deren Aktualität. Abbildung 1 zeigt einen Auszug aus der geographischen Landkarte am Beispiel Europa und verdeutlicht, an wie vielen Standorten in den jeweiligen Ländern eine Publikation identifiziert werden konnte.

Auf der Landkarte sind Institutionen, die Publikationen zu energetischen Einflussfaktoren in der Simulation in Produktion und Logistik verfasst haben, mit schwarzen Punkten markiert (vgl. Stoldt et al. (2016) in Chemnitz, Thiede (2012) in Braunschweig oder Andersson et al. (2012) in Göteborg). Teilweise forschen an einer Institution mehrere Fachgebiete in diesem Bereich. Beispiele dafür sind Peter und Wenzel (2015) sowie Hesselbach et al. (2008), die in unterschiedlichen Fachgebieten

an der Universität Kassel tätig sind, oder auch Rabe et al. (2015) und Kaffka et al. (2015) aus zwei Instituten der Technischen Universität Dortmund. In diesem Fall wird der Standort aus Gründen der Übersicht trotzdem nur durch einen Punkt markiert.

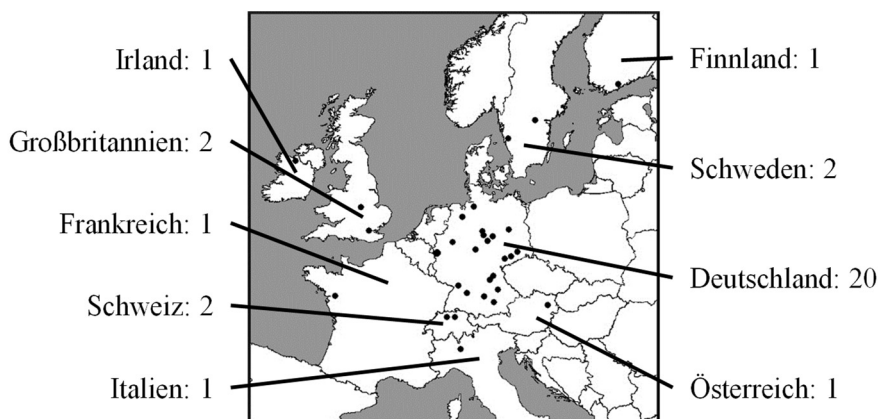


Abbildung 1: Landkarte mit den identifizierten Institutionen mit Publikationen in Europa (eigene Darstellung in Anlehnung an San Jose und Patro110 2017)

Eine Auswertung der geographischen Verteilung macht deutlich, dass knapp die Hälfte der identifizierten Institutionen in Deutschland ansässig ist, weitere 2 % in Österreich und 5 % in der Schweiz. Die internationalen Institutionen verteilen sich zu je 22 % auf das inner- und außereuropäische Ausland. Letzteres ist nicht auf der Landkarte dargestellt. Es zeigt sich, dass ein Schwerpunkt der bisher identifizierten Publikationen im deutschsprachigen Raum liegt, während in Frankreich und Großbritannien nur wenige Publikationen und im osteuropäischen Raum keine Publikation gefunden werden konnten. Für die weitere Arbeit an der Landkarte muss daher eine gezielte Recherche in den bisher nur bedingt vertretenen Ländern erfolgen.

Um ein ganzheitliches Bild zu ermöglichen und neben den Standorten auch die Institutionen und die Autorengruppen darzustellen, plant die Arbeitsgruppe, zukünftig die Karte mit den in diesem Themenbereich aktiven Forschungsinstitutionen auf einer webbasierten Plattform zu veröffentlichen. Auf dieser sollen auch die entsprechenden Literaturstellen sowie die beteiligten Autoren genannt werden. Die Web-Landkarte soll so die Voraussetzung schaffen, eigenständig ermitteln zu können, an welchen Standorten zu dieser Art der Simulation geforscht wird, und mögliche Ansprechpartner für einen fachlichen Austausch oder gemeinsame Projekte sichtbar machen. Darüber hinaus soll sie weiteren Forschern in diesem Bereich erlauben, sich aktiv mit ihren Publikationen einzubringen.

4 Übersicht betrachteter Branchen

Die Tagungsbände früherer Konferenzen im Bereich der Simulationstechnik zeigen, dass der Automobilbausektor häufiger Lieferant von Fallstudien ist. Dieses Bild bestätigte sich auch bei der Erstellung der Landkarte. Dabei ist einerseits die Zahl der

Arbeiten so groß und andererseits die Art der eingesetzten Prozesse so unterschiedlich, dass diese Branche nochmals in Fahrzeugbau (z. B. Schacht 2014) und Komponentenfertigung bzw. Zulieferteile (z. B. Khalaf 2012) unterschieden wird.

Insgesamt können Arbeiten aus 21 Branchen identifiziert werden. Im Einzelnen sind das: Automobilbau, Berg-/Tagebau, chemische Industrie, Elektronik-/Energie-technikproduktion, Entsorgung und Recycling, Halbleiterindustrie, Handel, Hoch-/Tiefbau, Holzindustrie, Logistik, Konsumgüterindustrie, Kosmetik- und Pharmaindustrie, kunststoffverarbeitende Industrie, Lebensmittelindustrie, sonstiger Fahrzeugbau, Maschinen- und Anlagen- sowie Werkzeugbau, Medizintechnik, Metallbearbeitung und -erzeugung, Stahl-/Metallbau, Textilindustrie sowie Verkehrslogistik/Verkehrsinfrastrukturplanung. Auffällig ist dabei, dass die aktiven Forschergruppen zumeist über Simulationsanwendungen aus unterschiedlichen Bereichen berichten. Somit verteilen sich die Arbeiten abseits des Automobilbaus relativ homogen über die weiteren sowohl energieintensiven als auch nicht energieintensiven Branchen. Erstaunlich ist in diesem Zusammenhang, dass keine Arbeiten aus der Baustoff- oder der Papierindustrie identifiziert werden konnten und auch in der chemischen Industrie nur eine Simulationsanwendung bekannt ist. Gründe hierfür lassen sich in Bezug auf Unzulänglichkeiten bestehender Simulationslösungen oder mangelndem Potenzial in der Simulationsanwendung vermuten; entsprechende Nachweise sind aber nicht aus der bisher vorliegenden Literatur abzuleiten.

5 Simulationsstudien entlang der Wertschöpfungskette

Die Kategorie „Fokus in der Wertschöpfungskette“ umfasst als Ausprägungen Rohstoffgewinnung und -verarbeitung, Beschaffung, Distribution, Produktion Intralogistik (einschließlich Warehousing), Verpackung sowie Entsorgung und Recycling. In den folgenden Abschnitten werden Simulationsstudien aus Produktion und Logistik mit energetischem Bezug auszugsweise für die Rohstoffgewinnung und -verarbeitung, für die Produktion und für logistische Prozesse dargestellt. Hierzu werden Beschaffung, Distribution und Intralogistik aus Platzgründen unter dem Begriff „logistische Prozesse“ zusammengefasst. Die Aspekte Verpackung, Entsorgung und Recycling werden in diesem Beitrag nicht adressiert.

5.1 Rohstoffgewinnung und -verarbeitung

Die Rohstoffgewinnung und -verarbeitung ist üblicherweise sehr energieintensiv und hat zumeist signifikante Umweltauswirkungen. Dabei wird im Kontext der Landkarte die Extraktion von Rohstoffen aus der Natur als Gewinnung und der darauffolgende Verarbeitungsschritt (z. B. Erz-Verhüttung zu Stahl oder Mahlen von Korn zu Mehl) als Rohstoffverarbeitung verstanden. Insgesamt hat die Literaturrecherche gezeigt, dass es nur sehr wenige Arbeiten in diesen Bereichen gibt. Diese behandeln insbesondere Tagebau-Fallstudien und fokussieren auf die Ermittlung von Äquivalenten zur Einschätzung der Ökobilanz. Dabei werden zumeist System-Dynamics-Modelle eingesetzt, in denen der eigentliche Produktionsfluss nur mittelbar Beachtung findet.

Um die Energieeffizienz in Systemen dieser Wertschöpfungsphasen zu steigern, ist die gleichzeitige Betrachtung des Anlagenbetriebs und des Energieverbrauchs bzw. der Umweltbeeinflussung von großer Bedeutung. Untersuchungen auf dieser

Betrachtungsebene haben bislang lediglich Fanghänel et al. (2015) für einen Braunkohletagebau vorgestellt. Jain et al. (2012) betrachten hingegen die Gänge von Prozessen einer Wertschöpfungskette mit System Dynamics, nutzen für Detailbetrachtungen jedoch auch die ereignisdiskrete Simulation, allerdings nur für die Produktionsphase. Wie bereits für die Baustoff- und Papierindustrie kann auch für diese Wertschöpfungsphasen ein Potenzial für weitere Arbeiten identifiziert werden.

5.2 Produktion

Dominierenden Zielgrößen zur Planung und zum Betreiben von Produktionsanlagen sind Kosten, Zeit und Qualität bzw. daraus abgeleitete produktionspezifische Kennzahlen wie Ausbringungsmenge, Bestände oder Produktionszeiten. Der Faktor Energie spielte bisher in diesem Zielgrößen Spannungsfeld kaum eine Rolle. Die in den letzten Jahren steigende Anzahl an Veröffentlichungen zeigt hier einen Wandel auf. Im Mittelpunkt der gesamten Wertschöpfungskette steht die eigentliche Produkterstellung. Dies spiegelt auch die Anzahl an Literaturstellen wider, die für einen weitflächigen Einsatz der Simulation mit Energiebezug spricht.

Nach Keller und Reinhart (2016) kann grundsätzlich zwischen der energieeffizienten und energieflexiblen Produktion unterschieden werden. Bei der Energieflexibilisierung von Anlagen steht im Vordergrund, die benötigte Energie zum richtigen Zeitpunkt bereitzustellen. Durch organisatorische Maßnahmen in der Produktionsplanung oder technisch angepasste Systeme werden einzelne Produktionsprozesse auf Basis ihres prognostizierten Energieverbrauchs mit dem Ziel angestoßen, den Lastgang der gesamten Fabrik zu optimieren (Liebl et al. 2015). Die analysierte Literatur zeigt, dass Energieflexibilität vornehmlich bei energieintensiveren Produktionsanlagen Beachtung findet. Umfangreichere Arbeiten finden sich jedoch im Bereich der Energieeffizienz.

Die energieeffiziente Produktion verfolgt den Ansatz, die eingesetzte Energie besser in der Produktion zu nutzen und eine höhere Energieproduktivität (Verhältnis von Energieeinsatz und gefertigter Menge) zu erreichen. Dabei kann zwischen direkt und indirekt zur Produkterstellung eingesetzter Energie differenziert werden. In beiden Fällen werden Simulationen mit Energiebezug sowohl für die Planung als auch für den Betrieb von Produktionsanlagen eingesetzt. Drei Schwerpunkte können unter Energieaspekten in den Arbeiten identifiziert werden:

- *Dimensionierung der Medienversorgung* der Produktionsanlage sowie der umgebenden Fabrikhalle: Planung aller wichtigen Medien wie Beleuchtung, Druckluft, Prozesswärme/-kälte, Klima- und Lüftungstechnik sowie elektrische Energie.
- *Technische Anlagenoptimierungen*: Optimierung von Beschleunigung, Geschwindigkeit und Bahnkurven von Industrierobotern und Fertigungsprozessen.
- *Optimierter Anlagenbetrieb*: Ausnutzung aller möglichen energetischen Betriebszustände (Operational, Standby, Off) von Anlagen und Maschinen.

5.3 Logistische Prozesse

Logistische Prozesse lassen sich grob in intralogistische Prozesse (innerhalb einer Betriebsstätte) und die verbindenden Prozesse der Supply Chain unterscheiden, wobei letztere sowohl die Beschaffung als auch die Distribution miteinschließen. Während im Allgemeinen über deutlich mehr Simulationsstudien im Bereich der Intralogistik

berichtet wird, sind Simulationsstudien unter Einbeziehung energetischer Aspekte im Bereich der Supply Chains häufiger. Dies mag darin begründet sein, dass in Zeiten der Globalisierung und eines entsprechenden Transportaufkommens Prozesse der Supply Chains signifikant zum Energieverbrauch und damit auch zur Umweltbelastung beitragen. In diesem Zusammenhang ist technologisch zu berücksichtigen, dass bei der Anwendung für Supply Chains anstelle der ereignisdiskreten Simulation teilweise mit Zeitscheiben (beispielsweise von einem Tag) gerechnet wird, was je nach Granularität der abzubildenden Steuerungen auch durchaus hinreichend sein kann. Weitere Ansätze verwenden etwa System Dynamics oder – dann ohne Berücksichtigung der Zeit – auch Monte-Carlo-Simulation (z. B. Gruler et al. 2017). Gerade für eher strategische Aspekte der Supply Chain (etwa im Themenfeld der Beschaffung) bietet sich System Dynamics als Lösungsmethode an (vgl. Boosothonsatit et al. 2012; Jain et al. 2012).

Allgemein stehen Nachhaltigkeitsaspekte bei den Studien selten im Vordergrund (vgl. Rabe und Deininger 2012), wobei allerdings zu berücksichtigen ist, dass die Einsparung von Kosten durch Optimierung der Transportleistung typischerweise auch zu Energieeinsparungen führt. Rabe und Deininger (2012) zeigen auch auf, dass das Modell häufig nur logistische Daten liefert, aus denen nachträglich, indirekt die Energiebedarfe berechnet werden. Darüber hinausgehende Ansätze finden sich etwa bei Kaffka et al. (2015), die Kranspielen spezifische Energieverbräuche zuordnen, bei Grundmeier et al. (2015) für Teilaspekte von Containerterminals oder für die Zuordnung einzelner Transport- und Lagervorgänge in Mehrproduktsystemen bei Brockmann (2013) sowie Rabe et al. (2015).

Eine detailliertere Betrachtung der energetischen Aspekte von Transportanlagen findet sich in einigen intralogistischen Anwendungen. So betrachten etwa Cataldo et al. (2015) für eine produktionstechnische Anwendung sowie Rudolph et al. (2012) für eine Gepäckförderanlage das Transportsystem bis auf die Aktuatoren- und Motorenebene hinunter und können so den Energieverbrauch im Detail, etwa für stromsparende Leerlaufmodi, berücksichtigen.

Generell ist anzumerken, dass entsprechende Aspekte der Nachhaltigkeit (insbesondere für die Supply Chain) im Forschungsfeld der Life Cycle Analysis (LCA) auf breiter Basis untersucht werden, jedoch hier der Detaillierungsgrad im Hinblick auf die logistischen Prozesse völlig anders ist als bei der Betrachtung mit Simulation. So zeigen Gutenschwager et al. (2013), dass der unreflektierte Einsatz sonst üblicher und zielführender LCA-Berechnungsansätze für das Ziel der Energieeinsparung unter Optimierung der logistischen Detailprozesse völlig ungeeignet sein kann.

Zunehmend an Bedeutung gewinnt die Simulation für Transporte in urbanen Räumen, wo über die Energieeinsparung hinaus auch andere Aspekte der Nachhaltigkeit, wie Lärm, Verkehrsstaus, Feinstäube u.v.m., im Fokus stehen. Gerade in Ballungsräumen würden sich hier Kollaborationen zwischen Unternehmen anbieten, die aber – vor allem aus Überlegungen von Marketing, Kundenbindung oder Prozesshoheit heraus – noch überraschend wenig genutzt werden. Hier kann mit Simulation die konkrete Energieeinsparung aufgezeigt werden, die zunächst auch immer mit einer Kosteneinsparung verbunden ist, welche aber mit zusätzlichen Aufwänden (etwa für zusätzliche Umschlagprozesse oder Umschlagzentren) ins Verhältnis gesetzt werden muss. Neuere Beispielstudien haben gezeigt, dass Einsparungen der gefahrenen Kilometer in Bereich von 20 % realistisch sein können (Rabe et al. 2016). Indes kann

die Zusammenführung von Logistiksystemen grundsätzlich auch einen gegenteiligen Effekt haben (vgl. Rabe et al. 2015), was eine vorherige Simulationsanalyse erforderlich macht.

6 Fazit und Ausblick

Mit einer systematischen Analyse der bislang veröffentlichten Forschungs- und Praxisarbeiten im Themenfeld der simulativen Betrachtung von energetischen Einflussfaktoren in Produktion und Logistik konnte die ASIM-Arbeitsgruppe den bisherigen Stand von Wissenschaft und Technik erfassen. Dieser wurde übersichtlich in einer Forschungslandkarte zusammengestellt, die sowohl die Aktivitäten regional darstellt als auch Bedarf und Bereitschaft von Branchen und Nationen sehr gut widerspiegelt. Durch die Analyse und Aufbereitung ist es zudem gelungen, einerseits die Notwendigkeit der Betrachtung dieser Faktoren zu untermauern und andererseits eine grundlegende Basis für die Entwicklung eines Standards für die Durchführung von Simulationsstudien mit Berücksichtigung energetischer Einflussfaktoren zu definieren.

Die Arbeitsgruppe wird im nächsten Schritt eine Themen-Datenbank zur Sicherung des Wissensstandes einrichten, die durch weitere publizierte Forschungsarbeiten ergänzt werden soll. Dabei soll der Betrachtungsfokus gezielt ausgeweitet werden, um Aspekte, etwa basierend auf Regelungen oder Besonderheiten in bislang nicht betrachteten Branchen und speziell in zusätzlichen Staaten, einzubringen und so einen umfassenden, international geltenden Stand zu erzielen und zu publizieren. Einen Ansatz zur Internationalisierung stellt etwa die Vorstellung und Diskussion des Ergebnisstandes auf der WinterSim-Konferenz 2018 in Göteborg dar.

Danksagung

Die Ergebnisse wurden im Rahmen der Arbeitsgruppe „Berücksichtigung energetischer Einflussfaktoren in SPL“ in der ASIM-Fachgruppe „Simulation in Produktion und Logistik (SPL)“ erarbeitet. Die Autoren danken ausdrücklich allen Mitgliedern der Arbeitsgruppe.

Literatur

- Andersson, J.; Skoogh, A.; Johansson, B.: Evaluation of methods used for life-cycle assessments in Discrete Event Simulation. In: Laroque, C.; Himmelspach, J.; Pasupathy, R.; Rose, O.; Uhrmacher, A. (Hrsg.): Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference. Berlin: IEEE 2012.
- Bauernhansl, T. (Hrsg): Energieeffizienz in Deutschland - eine Metastudie. Berlin, Heidelberg: Springer 2014.
- Boosothonsatit, K.; Kara, S.; Ibbotson, S.: A Generic Simulation Model for Green Supplier Selection. In: Dornfeld, D.A.; Linke, B.S. (Hrsg.): Leveraging Technology for a Sustainable World. Berlin, Heidelberg: Springer 2012, S. 587–592.
- Brockmann, D.: Ansatz zur Bestimmung des Carbon Footprint für die Distributionslogistik von Fast Moving Consumer Goods mit Hilfe von Simulation.

- Dortmund: TU Dortmund, Fachgebiet IT in Produktion und Logistik, Masterarbeit, 2013..
- Cataldo, A.; Scattolini, R.; Tolio, T.: An energy consumption evaluation methodology for a manufacturing plant. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 11 (2015), S. 53–61.
- Fanghänel, C.; Schlegel, A.; Stoldt, J.; Putz, M.; Lange, H.R.; Woldt, T.: Energieeffizienzsteigerung im Tagebaubetrieb durch simulationsgestützte Untersuchung konkurrierender Flexibilitäten. In: Rabe, M.; Clausen, U. (Hrsg.): *Simulation in Production and Logistics 2015*. Stuttgart: Fraunhofer 2015, S. 545–554.
- Gruler, A.; Klueter, A.; Rabe, M.; Juan, A.A.: A Simulation-Optimization Approach for the Two-Echelon Location Routing Problem Arising in the Creation of Urban Consolidation Centers. In diesem Tagungsband. 2017.
- Grundmeier, N.; Ihle, N.; Hahn, Z.: Ein Simulationsmodell zur Abbildung und Prognose der elektrischen Leistungsaufnahme in Seehafen-Containerterminals. In: Rabe, M.; Clausen, U. (Hrsg.): *Simulation in Production and Logistics 2015*. Stuttgart: Fraunhofer 2015, S. 555–564.
- Gutenschwager, K.; Rabe, M.; Sari, M.U.; Fechteler, T.: A data model for carbon footprint simulation in consumer goods supply chains. In: Pasupathy, R.; Tolk, A.; Hill, R.; Kuhl, M.E. (Hrsg.): *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference*. Savannah: IEEE 2013, S. 2677–2688.
- Hesselbach, J.; Herrmann, C.; Detzer, R.; Martin, L.; Thiede, S.; Lüdemann, B.: Energy Efficiency through optimized coordination of production and technical building services. In: Kaebnick, H. (Hrsg.): *Applying life cycle knowledge to engineering solutions*. Sydney, Australia: 2008, S. 624–628.
- Jain, S.; Lindskog, E.; Johansson, B.: Supply chain carbon footprint tradeoffs using simulation. In: Laroque, C.; Himmelspach, J.; Pasupathy, R.; Rose, O.; Uhrmacher, A. (Hrsg.): *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference*. Berlin: IEEE 2012, S. 1–12.
- Kaffka, J.; Clausen, U.; Miodrag, Z.; Pitsch, M.: Allokation von Emissionswerten auf Behälterebene in multimodalen Umschlagsanlagen mittels Simulation. In: Rabe, M.; Clausen, U. (Hrsg.): *Simulation in Production and Logistics 2015*. Stuttgart: Fraunhofer 2015, S. 565–574.
- Keller, F.; Reinhart, G.: Energy Supply Orientation in Production Planning Systems. *Procedia CIRP* 40 (2016), S. 244–249.
- Khalaf, S.: Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Erstellung energieeffizienter Fertigungsstrategien für verkettete Fertigungssysteme. Aachen: Shaker 2012.
- Liebl, C.; Popp, R.; Zäh, M.F.: Energieflexibilität von Produktionsanlagen–Energieflexibilitäts-Kennfelder zur Abschätzung der Energieflexibilitäts-Potentiale unterschiedlicher Anlagen. *wt Werkstattstechnik online* 105 (2015) 3, S. 136–140.
- Müller, E.; Engelmann, J.; Löffler, T.; Strauch, J.: *Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben*. Berlin, Heidelberg: Springer 2009.
- 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 2015, S. 535–544.
- Rabe, M.; Clausen, U.; Klueter, A.; Poeting, M.: An approach for modeling collaborative route planning in supply chain simulation. In: Roeder, T.M.K.; Frazier, P.I.; Szechtman, R.; Zhou, E.; Huschka, T.; Chick, S.E. (Hrsg.):

- Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference. IEEE 2016, S. 2228–2238.
- Rabe, M.; Deininger, M.: State of Art and Research Demands for Simulation Modeling of Green Supply Chains. *International Journal of Automation Technology* 6 (2012) 3, S. 296–303.
- Rabe, M.; Sari, M.U.; Fechteler, T.; Ruini, L.F.: Discrete event simulation as a strategic decision instrument for a CO₂ – and cost-efficient distribution chain applied in the FMCG sector. *International Journal of Advanced Logistics* 4 (2015) 1, S. 47–53.
- Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.
- Roemer, A.C.; Strassburger, S.: A review of literature on simulation-based optimization of the energy efficiency in production. In: Roeder, T.M.K.; Frazier, P.I.; Szechtman, R.; Zhou, E.; Huschka, T.; Chick, S.E. (Hrsg.): *Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference*. Washington DC: IEEE 2016, S. 1416–1427.
- Rudolph, M.; Mohsen, A.; Reinschke, J.; Halmuschi, N.; Hassel, J.: *Simulation von Maschinen und Anlagen zur Verbesserung der Energieeffizienz*. Tagungsband „Intelligent vernetzte Arbeits- und Fabrikssysteme–VPP2012“ Chemnitz: TU Chemnitz IBF (2012), S. 191–201.
- San Jose; Patrol110: *File:Europe countries map.png* – Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Europe_countries_map.png&oldid=120922341. Letzter Zugriff am 26.04.2017.
- Schacht, M.: *Erweiterung des Planungsprozesses im Karosserierohbau um Energieaspekte zur Auslegung der Technischen Gebäudeausrüstung*. Herzogenrath: Shaker 2014.
- Sproedt, A.; Plehn, J.; Schönsleben, P.; Herrmann, C.: A simulation-based decision support for eco-efficiency improvements in production systems. *Journal of Cleaner Production* 105 (2015), S. 389–405.
- Stoldt, J.; Schlegel, A.; Putz, M.: Enhanced integration of energy-related considerations in discrete event simulation for manufacturing applications. *Journal of Simulation* 10 (2016) 2, S. 113–122.
- Thiede, S.: *Energy Efficiency in Manufacturing Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer 2012.
- Thiede, S.; Seow, Y.; Andersson, J.; Johansson, B.: Environmental aspects in manufacturing system modelling and simulation—State of the art and research perspectives. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 6 (2013) 1, S. 78–87.
- Wenzel, S.; Weiß, M.; Collisi-Böhmer, S.; Pitsch, H.; Rose, O.: *Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.