

# Energieeffizienz in der Automobilindustrie

## *Ganzheitliche simulationsgestützte Planung und Bewertung*

Sigrid Wenzel, Mark Junge, Carsten Pöge und Sven Spieckermann

**Dr.-Ing. Mark Junge** ist Geschäftsführer der Limón GmbH, Kassel.

**Dipl.-Kfm. Carsten Pöge** ist IT-Projektleiter Ablaufsimulation im Programm Digitale Fabrik der Volkswagen AG.

**Dr.-Ing. Sven Spieckermann** ist Mitglied des Vorstands des Simulationsdienstleisters SimPlan AG und lehrt Simulation in Darmstadt, Braunschweig und Karlsruhe.

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sigrid Wenzel** ist geschäftsführende Direktorin des Institutes für Produktionstechnik und Logistik an der Universität Kassel und leitet das Fachgebiet Produktionsorganisation und Fabrikplanung.

**Qualifizierte Leistungsangebote zur kombinierten Bewertung von Energieeffizienz und Materialfluss innerhalb der Produktion finden sich heute kaum am Markt. Stattdessen werden Einzelaspekte betrachtet. Um eine ganzheitliche Bewertung zu ermöglichen, sind jedoch Energie und Produktion/Logistik gemeinsam abzubilden. Der Beitrag erläutert diese Vorgehensweise und diskutiert Nutzenaspekte.**

### [In diesem Beitrag lesen Sie:](#)

- warum die Produktion betreffenden Energieflüsse in Modellen zur Produktions- und Logistiksimulation berücksichtigt werden müssen,
- wie eine energetische Bewertung der Produktions- und Logistikprozesse möglich wird, und
- welcher Nutzen für die Anwendung entsteht.

### **Berücksichtigung der Energie in der Produktion**

Laut VDI werden „die effiziente Nutzung von Energie bei der Herstellung von Produkten und dem Betrieb von Anlagen schon heute als Differenzierungsmerkmal bezeichnet“ ([1], S. 12) und das Paradigma der lohnkostenorientierten Verlagerung der Produktion durch eine von den Energiekosten bestimmte Globalisierung der Produktion abgelöst. Mit 27% des Gesamtenergieverbrauchs (vgl. auch [3] und [4]) stellt die Produktion einen Hauptverbraucher von Energie in Deutschland dar [2]. Zur Verbesserung der Energieeffizienz in Produktionsstätten lassen sich unterschiedliche externe und interne Treiber erkennen [5]: Externe Treiber sind steigende Energiepreise, wachsende Energienachfrage, sinkende Energiereserven und Versorgungssicherheit, nachgewiesene Umweltbelastungen durch Energieerzeugung und -nutzung sowie politische Restriktionen. Interne Treiber beziehen sich darauf, dass der Energiekostenanteil eine wirtschaftlich relevante Größenordnung erreicht, die Rechtsverträglichkeit der Produktionsstätten gesichert werden muss und dass durch neue Fertigungstechnologien (wie z. B. das Laserschweißen) ein steigender Energiebedarf entsteht. Eine Vorstellung über die Verteilung des Endenergieverbrauchs auf Industrie, Verkehr, Haushalte und Gewerbe, Handel und Dienstleistungen gibt das Energieflussbild 2011 für die Bundesrepublik Deutschland (vgl. Bild 1).

Die Idee, Energieaspekte bei der Planung und Analyse der Produktion zu berücksichtigen, wird heute bereits in verschiedenen Forschungen zur energieeffizienten Produktion umgesetzt (vgl. z. B. [7]). Diverse Veröffentlichungen [8-11] benennen bereits Einsparungspotentiale aus Erfahrungen mit Industrieprojekten, die je nach Produktionssystem und Vorgehensweise bis zu 30% umfassen können. Allerdings entstehen mit Initiativen wie „Think Blue. Factory“, nach der Volkswagen bis 2018 in allen Werken weltweit den Verbrauch von Energie und Wasser, das Abfallaufkommen, die Menge der Lösemittlemissionen sowie den Ausstoß von CO<sub>2</sub> um jeweils 25%, bezogen auf die Werte des Jahres 2010, senken will, ganz neue Anforderungen auch im Bereich der Planung von Fabriken und Anlagen. Anhand bisheriger digitaler Modelle ist der Energiebedarf nur grob prognostizierbar gewesen – in der Planung wird daher mit Sicherheitszuschlägen kalkuliert, die Überdimensionierungen der Versorgungsinfrastruktur zur Folge haben. Die dynamische Betrachtung der Prozesse und Systeme einschließlich der Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen Information, Material und Energie mittels Simulation wird damit zu einer wichtigen Voraussetzung für eine gesicherte Planung (zur Simulation vgl. z. B. [12]).

### **Bewertung des Energieverbrauchs**

An der Einbeziehung von energetischen Aspekten in Materialflusssimu-

lationen wird bereits seit einigen Jahren intensiv gearbeitet [13-15]. So sind z. B. die Hersteller von ereignisdiskreter Simulationssoftware bemüht, ihre Werkzeuge in diese Richtung zu erweitern und zu ergänzen. Die Energieaufnahme der Simulationsbausteine (beispielsweise einer Maschine) wird dabei in vielen Fällen an die aus der Materialflusssimulation bekannten Zustände von Ressourcen wie „wartend“, „arbeitend“, „gestört“ oder „pausiert“ geknüpft. Mit den auf diese Weise ergänzten Bausteinen können einzelne energetische Aspekte wie die elektrische Leistungsaufnahme simuliert werden. So enthält beispielsweise der VDA Automotive Baustein [16] als standardisierte Objektbibliothek für das Simulationssystem Plant Simulation einfache Funktionen zur energetischen Bewertung von Planungsalternativen. Damit können die bisher durch Sicherheitszuschläge verursachten Überdimensionierungen der Versorgungsinfrastruktur reduziert und die Fahrweise von Anlagen nach energetischen Gesichtspunkten verbessert werden. In ersten Pilotprojekten zeigt sich, dass durch die Einbeziehung energetischer Kennzahlen in Ablaufsimulationsprojekte ein Beitrag zur Reduzierung des Energieverbrauchs in der Fertigung geleistet werden kann. Auch wenn sich mit diesem Vorgehen Erfolge bezüglich eines effizienteren Umgangs mit Energie erzielen lassen, sind diese Ansätze typischerweise in unterschiedlicher Hinsicht begrenzt:

- Aggregate mit komplexen Verläufen bei der Energieaufnahme (beispielsweise Öfen oder Fermenter)

lassen sich nicht oder nur stark vereinfacht abbilden.

- Wechselwirkungen zwischen thermischen Abläufen in kompletten Gebäuden und der Wärmeentwicklung der Fertigungseinrichtungen werden nicht berücksichtigt.
- Die Betrachtung ist in vielen Fällen auf einzelne oder sogar nur auf ein Medium (z. B. die aufgenommene elektrische Leistung) begrenzt.

- An welchen Stellen im Prozess gibt es Wechselwirkungen zwischen Produktions- und Logistikanlagen und Medienverbräuchen?
- Welche Bedingungen müssen vorliegen, damit sich eine integrierte simulative Betrachtung dieser Wechselwirkungen lohnt?
- Wie sind diese Wechselwirkungen zu beschreiben, so dass sie sowohl für Produktions- und Logistikspezialisten als auch für Experten im Bereich Energieeffizienz und -management verständlich und eindeutig spezifiziert sind?
- Welche Informationen müssen die produktionslogistischen Modelle für energetische Modelle bereitstellen und umgekehrt?
- Wie genau erfolgt die Integration der Modelle aus technischer, aber vor allem auch aus semantischer Sicht?

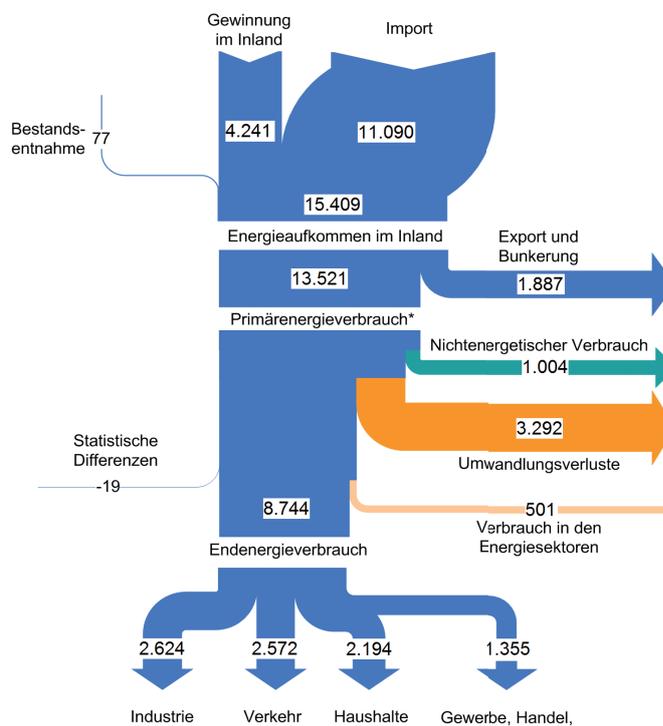


Bild 1: Energieflussbild 2011 für die Bundesrepublik Deutschland in Petajoule (Abweichungen in den Summen sind rundungsbedingt. Alle Zahlen sind vorläufig/geschätzt), in Anlehnung an [6].

Umgekehrt berücksichtigen thermische Simulationen von Gebäuden oder einzelnen Maschinen in der Regel unterschiedliche Lastsituationen, die sich aus der Steuerung der Produktion oder aus logistischen Abläufen ergeben, nicht. Ein ganzheitlicher Ansatz bietet die Möglichkeit, energetische Aspekte und produktionslogistische Ansätze integriert zu betrachten und nach Bedarf zu vertiefen oder zu fokussieren. Ein solcher Ansatz muss eine ganze Reihe von Fragen beantworten:

## Integrationskonzepte

Damit eine ganzheitliche energetische Bewertung der Produktions- und Logistikprozesse erreicht werden kann, können hybride Simulationswerkzeuge, die sowohl kontinuierliche als auch ereignisdiskrete Methoden enthalten, eingesetzt werden, oder – wie im Rahmen dieses Beitrags favorisiert – die in den jeweiligen Fachdisziplinen etablierten Simulationswerkzeuge für eine gemeinsame Nutzung integriert werden. Hierzu müssen die Simulationsmodelle interoperabel sein, d. h. die Fähigkeit der Zusammenarbeit basierend auf einem Datenaustausch besitzen [17]. Zur Umsetzung von Interoperabilität werden die Offline- und die Online-Kopplung zwischen Simulationswerkzeugen zur Ablaufsimulation und zur thermodynamischen Simulation unterschieden. Bei der Offline-Kopplung berechnet die logistische Simulation beispielsweise zeitlich aufgelöste Energiebedarfe

oder Regulationssignale. Diese Daten werden nach Simulationseende an die thermodynamische Simulation übergeben und dort als Eingangsparameter genutzt. Die thermodynamische Simulation errechnet aufgrund dieser Daten u. a. entsprechende Heiz-, Kühl- und Medienbedarfe (Strom, Gas) sowie Temperaturverläufe innerhalb relevanter Module. Diese Methode

kann dann die für logistische Entscheidungsprozesse notwendigen thermodynamisch abhängigen Vorgänge zu einem entsprechenden Ereignis berechnen. Allerdings könnten auf diese Weise keine für die Produktionssimulation kritischen thermodynamischen Restriktionen zu nicht bekannten Zeitpunkten ermittelt werden. In diesem Fall müsste die thermodynamische

Plattform zur Integration von Materialfluss- und Energiesimulation ist in Bild 2 dargestellt.

### Anwendungsfelder und Nutzen

Wie beschrieben werden im Rahmen der Digitalen Fabrik in der Automobilindustrie zurzeit an ver-

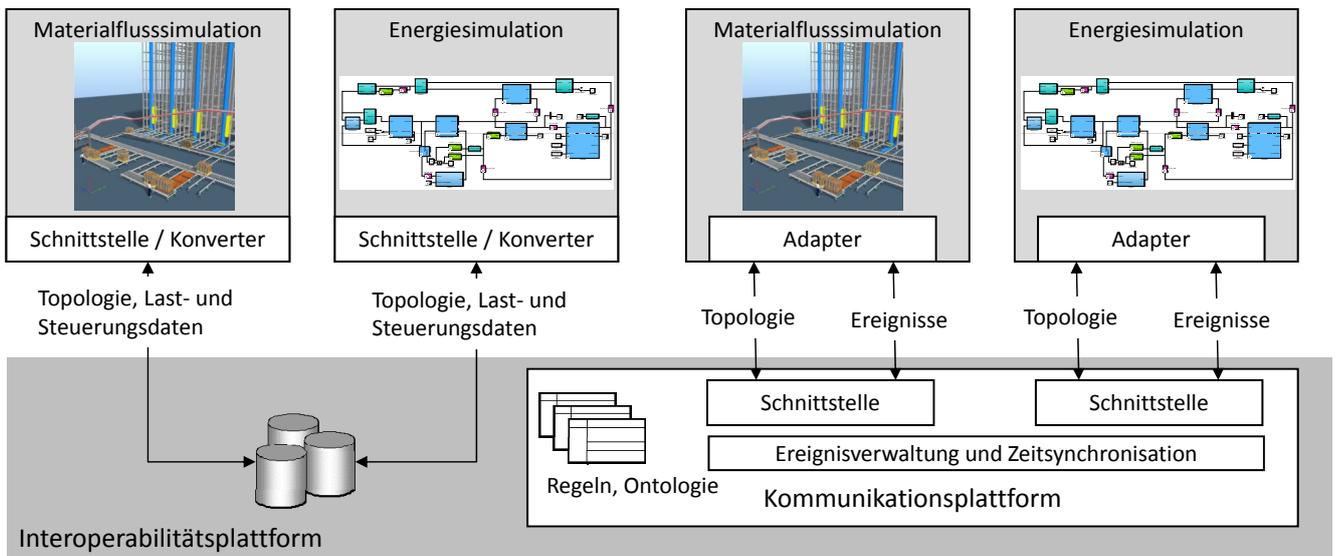


Bild 2: Geplante Interoperabilitätsplattform.

bietet einen praktischen simulativen Ansatz bei Prozessen, in denen keine oder zumindest keine relevanten Rückkopplungen zu erwarten sind. Wenn aber direkte Wechselwirkungen zwischen thermodynamischen und logistischen Vorgängen auftreten können, sollte eine Online-Kopplung realisiert werden. Hierbei tauschen die thermodynamische und logistische Simulation Informationen zu relevanten Prozesszuständen während ihrer Modelllaufzeit aus. Das notwendige Kopplungsprinzip zur Synchronisation der Modelllaufzeiten muss sich an den jeweiligen Anwendungsgegebenheiten orientieren. Beispielsweise könnte ein praxisnahes Konzept darin bestehen, dass die Materialflusssimulation als „Entscheidungsträger“ vorwegläuft, um bei relevanten Ereignissen bzw. kritischen Zuständen die thermodynamische Simulation anzustoßen. Diese

Simulation als „Master“ definiert und ein Rollback-Verfahren bei kritischen Ereignissen in der Materialflusssimulation umgesetzt werden. Zur Sicherstellung einer laufzeiteffizienten Synchronisation in Abhängigkeit von anfallenden Zustandswechseln kann auch eine dynamische Bestimmung der Laufweite pro Synchronisationsschritt eine zweckmäßige Lösung sein. Damit die richtige Bedeutung der jeweils auszutauschenden Modellinformation im vernetzten Kontext sichergestellt wird, müssen die Begriffswelten der zu koppelnden Werkzeuge abgeglichen und aufeinander abgestimmt werden. Dazu ist ein ontologiebasiertes Regelwerk erforderlich, dessen Notwendigkeit sich z. B. daran verdeutlichen lässt, dass die thermodynamische Simulation ganz andere Zustände für Objekte verwendet als die Produktions- und Logistiksimulation. Die geplante

schiedenen Stellen Einzelaspekte zur Energiesimulation betrachtet. So umfassen Untersuchungen den Energieverbrauch von Industrierobotern in Abhängigkeit von Bewegungsgeschwindigkeiten, Beschleunigung, Bahnkurve der Bewegung und Positionierung des Roboters in Relation zum Arbeitsplatz oder auch die thermische Gebäudesimulation zur Sicherstellung und Verbesserung des Komforts und der Energieeffizienz von Fabrikhallen. Allerdings lässt die energetisch effiziente Auslegung eines einzelnen Roboters nicht notwendigerweise auf die energieeffiziente Auslegung des Gesamtsystems (z. B. eines Karosseriebaus) schließen. Hier können aus der Integration der Modelle zur Verbesserung der einzelnen Roboter in das Modell der Ablaufsimulation der Gesamtanlage zusätzliche Erkenntnisse gewonnen

werden. Auch wäre es denkbar, dass die Kombination der Belüftungssimulation einer Halle mit der Ablaufsimulation der in der Halle betriebenen Produktionsanlage zu genaueren Aussagen zur energieeffizienten Auslegung der Steuerung der Belüftung, Heizung und der technischen Absaugungen führen kann. Mit Hilfe eines integrierten Simulationsansatzes wird für die Industrie die Möglichkeit bestehen, die energetischen Aspekte der Fertigung (abgebildet in den verschiedenen Detaillierungsgraden auf Maschinen- und Anlagenebene) im Kontext sowohl mit ihrer Versorgungsinfrastruktur als auch dem umgebenden Gebäude abzubilden und simulativ hinsichtlich der Energieeffizienz des Gesamtsystems zu bewerten, gleichzeitig aber auch die klassischen Kenngrößen der Ablaufsimulation wie Durchsatz oder Reihenfolgestabilität zu berücksichtigen. Der Nutzen dieses Simulationsansatzes für Volkswagen besteht in einem wichtigen Beitrag zur Erreichung der in der Initiative „Think Blue. Factory“ formulierten Ziele zur Senkung des Energieverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen sowohl durch die energetische Gesamtbetrachtung in der Planungsphase für neue Standorte als auch durch die energetische Optimierung bestehender Gebäude und Fertigungsprozesse.

### Weiteres Vorgehen und Ausblick

Da die positiven Effekte der Digitalen Fabrik erst durch die Integration aller Teildisziplinen in ein Gesamtkonzept zum Tragen kommen, stellt sich die Frage, inwieweit durch die Integration der bestehenden Ansätze zur Materialfluss- und Energiesimulation zu einer Gesamtlösung zusätzliche Erkenntnisse gewonnen werden können. Im Rahmen des von der Hessen-Agentur geförderten Verbundprojektes „SimEnergy“ (369/13-08) werden hierzu Integrationskonzepte entwickelt und in der Automobilindustrie evaluiert.

*Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Projektes „SimEnergy – Simulationsgestützte Planung und Bewertung der Energieeffizienz für Produktionssysteme in der Automobilindustrie“, das von der HessenAgentur im Rahmen von Hessen Modellprojekte aus Mitteln der Energietechnologieoffensive Hessen – Projektförderung in den Bereichen Energieerzeugung, Energiespeicherung, Energietransport und Energieeffizienz unter dem Kennzeichen 369/13-08 gefördert wird.*

### Literatur

- [1] VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik; Studie Produktion und Logistik in Deutschland 2025 – Trends, Tendenzen, Schlussfolgerungen, 2012.
- [2] Abele E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion, Herausforderungen und Chancen. Carl Hanser München, 2011.
- [3] Prognos AG (Hrsg.): Energieeffizienz in der Industrie. VDMA Forum Energie Berlin, 2009.
- [4] Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.): Struktur des Energieverbrauchs nach Sektoren, 2010.
- [5] Müller, E.; Engelman, J.; Löffler, T.; Strauch, J.: Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben. Springer, Berlin, 2009.
- [6] Umweltbundesamt: Energieflussbild 2011: <http://www.umweltbundesamt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodelent=2257>; abgerufen am 09.06.2013.
- [7] Homepage des Leitprojektes des Landes Hessen zur Energieeffizienz (HIER!): [www.hier-hessen.de](http://www.hier-hessen.de); abgerufen am 09.06.2013.
- [8] Junge, M.: Energieeffizienz mit System: Auf dem Weg zur CO<sub>2</sub>-neutralen Fabrik. Log\_x Verlag, Ludwigsburg, 2012.
- [9] Hesselbach, J.: Energie- und klimaeffiziente Produktion: Grundlagen, Leitlinien und Praxisbeispiele. Vieweg & Teubner, Wiesbaden, 2012.
- [10] Westkämper, E.; Verl, A.: Energieeffizienz in der Produktion. Fraunhofer IPA Tagung, 15. März 2011, Stuttgart, 2011.
- [11] Neugebauer, R.: Energieeffizienz in der Produktion, Untersuchung zum Handlungs- und Forschungsbedarf. Fraunhofer-Gesellschaft München, im Auftrag des BMBF, vom Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA) betreut, 2008.
- [12] Wenzel, S.; Weiß, M.; Collisi-Böhmer, S.; Pitsch, H.; Rose, O.: Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik – Planung und Durchführung von Simulationsstudien. Springer, Berlin, 2008.
- [13] Kulus, D.; Wolff, D.; Ungerland, S.; Dreher, S.: Energieverbrauchssimulation als Werkzeug der Digitalen Fabrik. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 09 (2011), S. 585-589.
- [14] Martin, L.; Hesselbach, J.; Thiede, S.; Herrmann, C.: Energieeffizienz durch optimierte Abstimmung zwischen Produktion und technischer Gebäudeausrüstung. In: Rabe, M. (Hrsg.): Advances in Simulation for Production and Logistics Applications, Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2008, S. 177- 185.
- [15] Junge, M.: Simulationsgestützte Entwicklung und Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung. Kassel University Press, 2007.
- [16] Mayer, G.; Pöge, C.: Auf dem Weg zum Standard – Von der Idee zur Umsetzung des VDA Automotive Bausteinkastens: In: Zülch, G.; Stock, P. (Hrsg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2010, S. 29-36.
- [17] Bracht, U.; Geckler, D.; Wenzel, S.: Digitale Fabrik – Methoden und Praxisbeispiele. Springer, Berlin, 2011.

### Schlüsselwörter

Simulation, Energieeffizienz, Materialfluss, Produktion, Interoperabilität

### Energy efficiency in automotive industry – Holistic simulation-based planning and evaluation

Qualified service offerings for the combined evaluation of energy efficiency and material flow within the scope of production are hard to find on the market today. Instead, individual aspects are considered. To enable a holistic evaluation of energy and production/logistics, they have to be modeled jointly. This article comments the proceeding and discusses some beneficial aspects.

#### Keywords

Simulation, energy efficiency, material flow, production, interoperability

### Kontakt:

Universität Kassel  
 Fachgebiet Produktionsorganisation  
 und Fabrikplanung  
 Sigrid Wenzel  
 Kurt-Wolters-Straße 3  
 34125 Kassel  
 Tel.: +49(0)561 / 804-1851  
 Fax: +49(0)561 / 804-1852  
 E-Mail: [s.wenzel@uni-kassel.de](mailto:s.wenzel@uni-kassel.de)  
 URL: [www.uni-kassel.de/go/pfp](http://www.uni-kassel.de/go/pfp)