

# **Einfluss der Brammenlogistik auf den Energieverbrauch von Wärmeöfen in der Warmbreitbandstraße**

## ***Influence of Slab Logistics on Energy Consumption in the Continuous Furnaces of the Hot Rolling Mill***

Niklas Labitzke, Thomas Volling, Matthias Wichmann, Thomas S. Spengler  
Technische Universität Braunschweig, Institut für Automobilwirtschaft  
und Industrielle Produktion, Braunschweig (Germany)  
n.labitzke@tu-bs.de

**Abstract:** In this contribution we present a DES model of the slab logistics processes in an integrated steel mill which incorporates energy consumption behaviour of the slab furnaces. This way, we can evaluate different modes of operational planning and logistics in terms of their effect on energy costs. The focus is laid on the modeling of the slab ovens and model validation. However, since this study is embedded in a broader research of value-oriented simulation, we will give a short outlook of the benefits from incorporating technical oriented consumption behaviour into DES models and applying them to decision-oriented accounting.

## **1 Einleitung**

In einem integrierten Hüttenwerk zur Stahlherzeugung stellt das Warmwalzen die zentrale Schnittstelle zwischen der flüssigen Phase, in der die chemische Zusammensetzung der Stahlprodukte konfiguriert wird und der Kunden- bzw. weiteren Veredelungsseite dar. Die im Stahlwerk produzierten Brammen – quaderförmige Halbzeuge mit einem Gewicht zwischen 12 und 35 Tonnen – müssen für die losweise Bearbeitung in der Warmbreitbandstraße zunächst zwischengelagert und anschließend auf eine Umformtemperatur von ca. 1.250° C gebracht werden. Die Lagerung geschieht üblicherweise in Freilagern, die von Brückenkränen oder Reachstackern betrieben werden. Die Erwärmung erfolgt in gasbetriebenen Durchlauföfen und zählt mit zu den energieintensivsten Prozessschritten bei der Stahlherstellung.

Neben einer effizienten Ofenfahrweise haben insbesondere die vorgeschaltete Lagerlogistik sowie die operative Abstimmung zwischen Stahlwerk und Warmbreitbandstraße einen großen Einfluss auf den Energieeinsatz in den Wärmeöfen. Technische Lösungen wie Wärmehauben oder ein zügigerer Brammendurchsatz im Lager reduzieren den Enthalpieverlust der Brammen und damit die erforderliche Energie-

menge in den Öfen. Für die Bewertung möglicher Gestaltungsalternativen der Brammenlogistik stehen jedoch keine geeigneten Analyse- und Auswertungsinstrumente zur Verfügung.

In diesem Beitrag wird daher die Konzeption und Entwicklung eines geeigneten Modellierungsansatzes auf Basis der ereignisdiskreten Ablaufsimulation beschrieben. Ziel ist es, die monetären Potenziale einer hinsichtlich des Energieverbrauches in den Wärmeöfen verbesserten Brammenlogistik zu identifizieren. Die Ablaufsimulation ist in diesem Zusammenhang um eine technische Energieverbrauchs-funktion und eine zugehörige betriebswirtschaftliche Bewertungskomponente zu erweitern.

Hierzu wird in Kapitel 2 zunächst die Problemstellung im betrachteten Hüttenwerk konkretisiert. Darauf aufbauend erfolgt die Beschreibung des Modellierungsansatzes (Kap. 3) und der Validierung insbes. des Ofenmodells (Kap. 4). Der Beitrag schließt in Kapitel 5 mit einem Ausblick auf die Potentiale, welche der Modellierungsansatz für die weitere Entscheidungsunterstützung offenbart.

## 2 Ausgangslage

Traditionell werden der Stranggießbetrieb im Stahlwerk und das anschließende Warmwalzwerk durch ein zwischengeschaltetes Brammenlager technisch und planerisch entkoppelt. Ein direktes Auswalzen der heißen Stränge ist zwar aus energetischer Sicht wünschenswert, jedoch technisch bisher nicht realisierbar. Ursächlich hierfür sind u.a. Reihenfolge-Restriktionen der Warmbreitbandstraße, die maßgeblich von den Walzbreiten der Brammen abhängen und nicht mit den Ausstoß-Reihenfolgen der Stranggießanlagen in Einklang stehen. Zudem ist ein Teil der Brammen vorher in einem sog. Adjustagebetrieb auf Oberflächenfehler zu inspizieren und ggf. von diesen zu befreien. Trotz des Ziels, den Wärmeenergieverlust, der durch die Lagerung der Brammen entsteht, durch eine möglichst kurze Lagerdauer zu minimieren, beträgt der Anteil heiß eingesetzter Brammen ( $>300^{\circ}\text{C}$ ) bisher weniger als 10 %.

Die signifikante Erhöhung der Heißeinsatzquote ist jedoch nur durch eine systematische Änderung des Planungsprozesses realisierbar. Bisher berücksichtigt die Planung fast ausschließlich abgegossene Brammen in den Walzprogrammen. Eine signifikante Verkürzung der Lagerdauer lässt sich jedoch nur erreichen, wenn die Walzplanung antizipativ auf Basis noch nicht abgegebener Brammen erfolgt. Dies birgt neben höheren Einstoßtemperaturen in den Öfen zusätzlich den Vorteil, dass Brammen reihenfolgebezogen eingelagert werden können und damit weniger häufig umzulagern sind.

Eine derartige Umstellung erfordert zum einen Investitionen in ein modernes Lagerverwaltungssystem. Zum anderen sind die am Planungsprozess beteiligten Organisationseinheiten von der Vorteilhaftigkeit und Umsetzbarkeit der alternativen Planungsprozesse zu überzeugen. Aus diesen Gründen ist eine Berechnung der monetären und logistischen Konsequenzen auf Basis fundierter und belegbarer Untersuchungen unerlässlich. Im betrachteten Hüttenwerk existiert bisher allerdings kein detailliertes Beschreibungs- und Analysemodell des Brammenlagers, anhand dessen die komplexen Wirkungszusammenhänge zwischen Lagerdauer der Bram-

men und Auslastung der Lagereinrichtungen im Kontext der vielfältigen technischen und zeitlichen Restriktionen identifizierbar wären. Des Weiteren ist auch nicht der kausale Zusammenhang zwischen der Lagerdauer und des Abkühlverhaltens (und damit der Einstoßtemperatur) bekannt. Zuletzt können die energetischen Effekte durch unterschiedliche Brammen-Einsatztemperaturen bisher nur auf Basis einer stark vereinfachenden, statischen Spreadsheet-Kalkulation abgeschätzt werden. Diese berechnet den stündlichen Energieeinsatz bei Vorgabe des Brammendurchsatzes sowie einer durchschnittlichen Einstoßtemperatur. Beide Parameter unterliegen jedoch in der Realität ständigen Schwankungen. In der Konsequenz können unterschiedliche Planungs- und Logistikprozesse somit nur auf Basis statischer, hochaggrierter Kalkulationen, die mit großer Unsicherheit behaftet sind, verglichen werden. In der Literatur erwähnen ASSAF u.a. (1997) eine ähnliche Problemstellung. Die Modellierung der Wärmeöfen wird aber nur verbal ausgeführt, die zugrundegelegte Basisquelle ist als Masterarbeit nicht zugänglich.

### 3 Modellierung

Der im Folgenden beschriebene Modellierungsansatz basiert auf der ereignisdiskreten Ablaufsimulation. Diese hat sich als ein geeignetes Instrument zur Gestaltung der meist sehr komplexen logistischen Stahlprozesse etabliert. In Erweiterung zu üblichen Simulationsstudien, bei denen die Analyse in der Regel auf die logistischen Kenngrößen eines Systems (z.B. Durchlaufzeit, Auslastung, Durchsatz) beschränkt bleibt, wird im Rahmen der hier modellierten Wärmeöfen der Fokus auf die Bestimmung des Mengen- und Wertgerüsts des Energieeinsatzes gelegt. Die Ablaufsimulation nimmt aus Sicht der Produktionstheorie somit die Funktion einer Verbrauchsfunktion wahr. Die den Wärmeöfen vorgeschaltete Brammenlogistik und das durch sie induzierte Abkühlverhalten der Brammen determiniert in diesem Zusammenhang die Ausprägungen des Mengengerüsts, d.h. von ihr hängen die Einstoßtemperaturen der Brammen ab. Das Layout des betrachteten Systems ist in Abbildung 1 dargestellt.

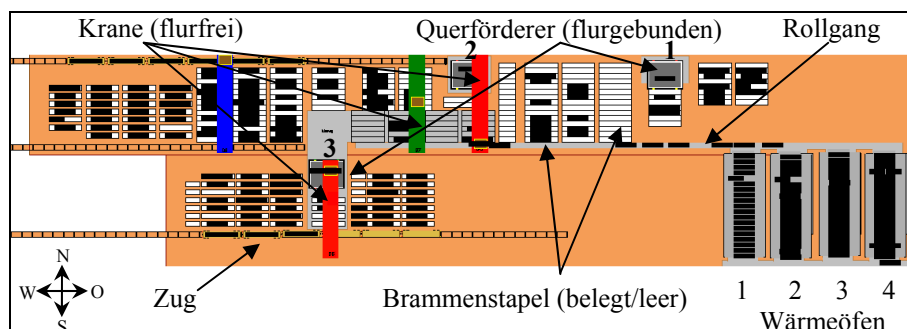


Abbildung 1: Draufsicht auf das Simulationsmodell

Der Materialfluss gestaltet sich wie folgt. Die Brammen gelangen einerseits direkt vom Stahlwerk per Zug in die mit insgesamt vier Brückenkränen betriebenen Blocklager. Andererseits werden Brammen, die in der Adjustage überarbeitet worden sind, über die Querfördereinrichtungen 1 und 2 in das Lager verfahren und eingelagert. Die täglichen Einfuhrmengen der verschiedenen Brammenkategorien unterliegen

normalverteilten Schwankungen. Es werden keine real durchgelaufenen Brammenfolgen im Modell hinterlegt, sondern sämtliche Brammenquantitäten und -qualitäten auf Basis statistischer Verteilungen generiert. Jede eingefahrene Bramme besitzt dabei individuelle Eigenschaften bzgl. Masse, Dimension, Kategorie (determiniert den Einfahrtsweg und die Dringlichkeit der Einplanung) und der Position auf dem Zug.

Die Krane lagern die Brammen ein, die Stapelhöhe auf den Lagerfeldern beträgt dabei bis zu 15 Brammen. Später werden die Brammen gemäß ihrer Walzreihenfolge vorsortiert und zum Bedarfszeitpunkt auf einen Rollgang gelegt, der sie zu einem von insgesamt vier Wärmeöfen befördert. Brammen, die im südlichen Blocklager eingelagert werden, gelangen über die Querfördereinrichtung 3 in das nördliche Lager, wo sie direkt auf den Rollgang gelegt werden.

### 3.1 Brammenlogistik

Um die Auswirkungen unterschiedlicher Gestaltungsalternativen auf das Verhalten der Logistikeinrichtungen sowie auf die Abkühlung der Brammen evaluieren zu können ist ein hohes Detailniveau bei der Modellierung zu wählen. Die Bewegungen der Krane sowie die Position der Waggonen, Rollgänge und Lagerplätze werden in x-, y- und z-Richtung maßstabsgetreu abgebildet. Eine besondere Herausforderung stellt die realistische Replikation der nicht-trivialen Steuerungsroutinen der Krane dar. Trotz ihrer sich überlappenden Aufgabenkomplexe dürfen sich diese nicht berühren. Die Zuordnung von Ein-, Um- und Auslagerungsaufträgen zu Kranen muss technische Restriktionen berücksichtigen und sich am aktuellen Lastzustand des Systems orientieren. Bspw. besitzen zwei der Krane Zangen zum Aufnehmen der Brammen und benötigen daher größere Abstände zwischen den Lagerfeldern (siehe Abb. 1). Die mit Magnet betriebenen Krane können demgegenüber keine Brammen aufnehmen, die heißer als 500°C sind. Im Rahmen der Wahl von Lagerplätzen für umzulagernde Brammen ist stets die Position der dadurch betroffenen Brammen im Walzprogramm zu berücksichtigen. Brammen, die früher aufzulegen sind, sollten nach Möglichkeit nicht zugedeckt werden. Insgesamt resultieren hieraus sehr umfangreiche Zuordnungsabfragen. Ziel ist es, das intuitive Entscheidungsverhalten der Kranfahrer möglichst realistisch darzustellen.

### 3.2 Abkühlverhalten der Brammen

Das Abkühlverhalten der Brammen während der Lagerung wird über empirisch ermittelte Funktionen modelliert. Die Grundlage hierfür bilden die umfangreichen Untersuchungen von VOIGT u.a. (1990) zum Abkühlverhalten von Brammen bei unterschiedlichen Bedingungen. Neben der (normalverteilten) Anfangstemperatur der Brammen beeinflussen die Lagerdauer und die Höhe der Brammen im Stapel die resultierende Temperatur.

$$T_{\text{resultierend}} = T_{\text{Anfang}} \cdot e^{-0,1343 \cdot \text{Höhe im Stapel}^{-0,485} \cdot \text{Lagerdauer}} \quad (1)$$

Je tiefer die Bramme im Stapel liegt, desto stärker profitiert sie von der Strahlung sie umgebender Brammen und desto weniger ist sie äußeren Witterungseinflüssen (Wind, Niederschlag) ausgesetzt. Sie kühlt daher langsamer ab. Die Temperatur

$T^{resultierend}$  einer Bramme wird bei jedem Umlagervorgang neu berechnet und stellt zuletzt die Einstoßtemperatur der Bramme dar.

### 3.3 Wärmeöfen

Der Modellierung des Energieverbrauches in den Öfen ging eine umfangreiche Datenanalyse voraus. Auf Basis der gemessenen Energieeinträge und der Informationen zu den eingestoßenen Brammen ließen sich starke Abhängigkeiten identifizieren. Diese sind allerdings nicht für einzelne Brammen, sondern lediglich für das gesamte im Ofen befindliche Brammenbündel beobachtbar. Starke Kausalitäten ergeben sich zwischen dem Energiegehalt (Enthalpie) des Brammenbündels, abhängig von der Masse und den Temperaturen der Brammen, und dem für das Brammenbündel erforderlichen Energieeintrag. Sinkt die Enthalpie des Brammenbündels, z.B. durch Ausstoß heißer Brammen und Zuführung kalter Brammen, erhöht sich der anschließend erforderliche Energieeintrag deutlich. Werden dagegen wärmere Brammen zugeführt, ist der erforderliche Energieeintrag geringer.

Um diese Zusammenhänge zwischen Enthalpie und Energieeintrag abbilden zu können, ist der Wärmeverlauf der einzelnen Brammen zu modellieren. Dies erfolgt über ein System gekoppelter Regelkreise. Die Brammen durchlaufen während ihrer Zeit im Ofen verschiedene Ofenbereiche mit unterschiedlichen Soll-Temperaturen und Heizintensitäten. Analog zum realen Prozess wird durch Regelkreise die jeweilige Abweichung von Soll- und Ist-Temperatur erfasst und der erforderliche Energieeintrag entsprechend eingestellt. In die Regelkreise gehen neben den Brammeneigenschaften (Temperatur und Masse) u.a. auch der Wirkungsgrad des Ofens, die spezifischen Wärmekapazitäten in Abhängigkeit der aktuellen Brammentemperatur und manuelle Fahrweisen bei Störungen und Wartungen ein.

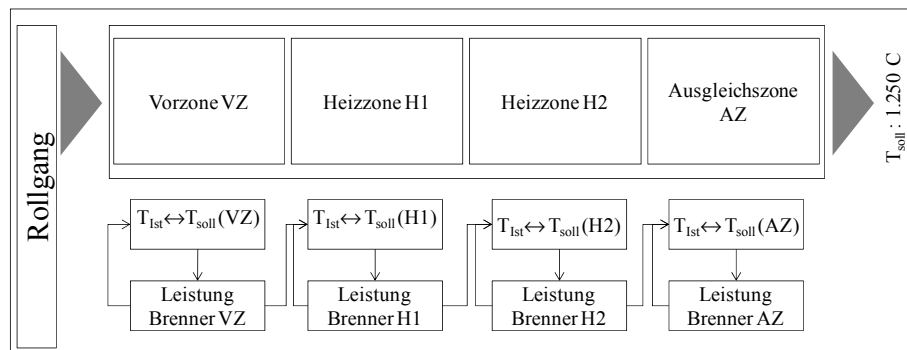


Abbildung 2: Prozessablauf (vereinfacht) der Öfen und Ofenmodelle

Die Regelung des Energieeintrags in den Heizzonen und die Aktualisierung der Ist-Temperaturen der Brammen erfolgt modellbedingt in diskreten Zeitintervallen (auf Minutenbasis). Diffusionseffekte des Energieeintrags zwischen den Heizzonen und Wärmeübertragungen zwischen den Brammen (Konvektion) werden nicht berücksichtigt. Hierzu wären kontinuierliche verfahrenstechnische Prozessmodelle für die Öfen zu entwickeln. Eine valide Replikation der thermischen Abläufe in den Öfen vermögen die hier dargestellten ereignisdiskreten Modelle daher nicht zu leisten. Sie sind stattdessen im Sinne einer Black-Box-Modellierung als ergebnisimitierende

Modelle, mit dem Zweck, den kausalen Zusammenhang zwischen Brammeneigenschaften und Energieverbrauch herzustellen, zu verstehen. Die Güte der Ofenmodelle lässt sich somit nur durch Vergleich von Modell- zu Realdaten beurteilen. In der Konsequenz ist für die Glaubhaftigkeit der Modellergebnisse der Validierung besondere Aufmerksamkeit zu schenken.

#### 4 Modellvalidierung

Zur Validierung des Modells zur Brammenlogistik kommen aus der Literatur bekannte Verfahren wie der Ereignisvaliditätstest, das Monitoring, das strukturierte Durchgehen, der Vergleich mit aufgezeichneten Daten sowie statistische Techniken (Anpassungstests) zum Einsatz (RABE u.a. 2008, S. 95 ff.). Da sich dieser Teil des Modells nur wenig von üblichen Simulationsmodellen der Produktion und Logistik unterscheidet, soll die Anwendung dieser Techniken hier nicht vertieft werden.

Die Validierung der Abkühlfunktion erfolgt anhand des Vergleichs mit aufgezeichneten Daten. Aus den betrieblichen Datenerfassungssystemen lassen sich die Lagerdauern sowie die Einstoßtemperaturen sämtlicher durchgesetzter Brammen entnehmen. Für die Anfangstemperaturen der Brammen bei Eintritt in das Lager existieren Stichproben, die Stapelhöhe wird in den Betriebssystemen jedoch nicht festgehalten. Die Validierung der Abkühlfunktion erfolgt zum einen statisch anhand einer durchschnittlichen Stapelhöhe für variierende Lagerdauern. Zum anderen werden die ermittelten Einstoßtemperaturen aus dem Simulationsmodell entnommen. Da im Simulationsmodell keine real durchgelaufenen Brammenfolgen verwendet werden (siehe Kap. 3), lassen sich die realen Daten und die Simulationsdaten nur anhand statistischer Kenngrößen vergleichen. Dies sind zuvorderst die mittleren Einstoßtemperaturen für unterschiedliche Brammenkategorien und Lagerdauern sowie Streuungs- und Extremalwerte.

Die Validierung der Modelle der Wärmeöfen soll hier gemeinsam mit der vorher durchzuführenden Parametrierung beschrieben werden. Die Modelle beinhalten einige Parameter wie Maximalbrennerleistung, mittlere Brennerleistung, Brennerleistung im Fall einer Störung etc., die exogen vorzugeben sind und im Rahmen der Regelkreissteuerung nicht verändert werden. Sie können jedoch bei der Modellierung in Grenzen variiert werden und sind infolgedessen zur Erzielung einer möglichst hohen Modellvalidität zu parametrieren. Der Prozess der Parametrierung und Validierung ist in **Abbildung 3** dargestellt.

Zur Parametrierung und Validierung werden die Ofenmodelle zunächst isoliert, d.h. ohne vorgelagertes Brammenlogistikmodell und anhand real durchgelaufener Brammenfolgen betrachtet. Hierfür werden drei Untersuchungszeiträume von drei bis acht Tagen Länge als Testinstanzen ausgewählt. Analog zum Vorgehen bei einem künstlichen neuronalen Netz erfolgt die Parametrierung anhand einer Testinstanz a (Trainingsdaten), während die übrigen Testinstanzen (b und c) zur Validierung des Modells herangezogen werden. Das Ziel der Parametrierung besteht darin, die exogenen Parameter  $P_a^{\text{exogen}}$  so festzulegen, dass die Abweichungen zwischen den realen und den modellbezogenen Verbrauchsdaten ( $e_a^{\text{real}}$  und  $e_a^{\text{modell}}$ ) minimiert werden. Dies erfolgt auf Basis der simulationsbasierten Optimierung mithilfe eines genetischen Algorithmus. Die Testinstanzen werden in weitere Sub-

instanzen untergliedert. Über die drei Untersuchungszeiträume stehen insgesamt 70 Subinstanzen zur Verfügung.

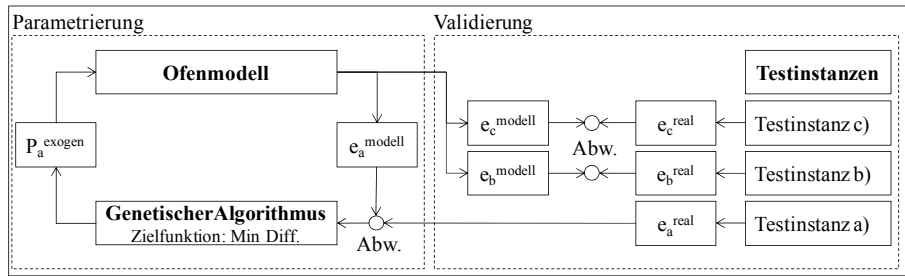


Abbildung 3: Prozess der Parametrierung und Validierung

Die Ergebnisse weisen auf eine gute Approximation der Energieverbräuche hin. In **Abbildung 4** sind die Mittelwerte, die Streuungen sowie die Maximalwerte der Abweichungen über alle Subinstanzen in allen drei Untersuchungszeiträumen dargestellt. Der linke Teil bezieht sich auf die Ofenmodelle, der rechte auf die statische Spreadsheet-Kalkulation. Die mittleren Abweichungen liegen bei den Ofenmodellen bei allen vier Öfen bei deutlich unter einem Prozent. Größere Abweichungen, insbes. die maximal gemessenen Abweichungen treten ausschließlich bei sehr kurzen Subinstanzen von weniger als einem Tag auf. Je länger die Subinstanz, umso geringer fallen in der Regel die Abweichungen auf. Da die Laufzeiten des Simulationsmodells mit 120 Tagen deutlich über den Zeitintervallen der Testinstanzen liegen, ist im Rahmen der Simulationsexperimente mit nur sehr geringen Abweichungen zu rechnen. Die in Kapitel 2 angesprochene statische Spreadsheet-Kalkulation weicht bei 54 von den 70 Subinstanzen stärker ab und approximiert die Energieverbräuche im Mittel um 3,51 Prozentpunkte schlechter. Auch die Streuung und die maximalen Abweichungswerte liegen deutlich höher (vgl. Abb. 4).

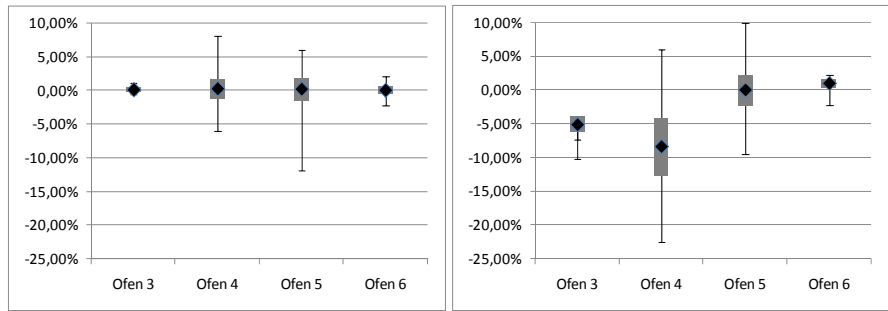


Abbildung 4: Abweichungen von Modell- zu Realenergieverbräuchen (Mittelwert, Streuung sowie Maximum & Minimum). Links: Ofenmodell, Rechts: Spreadsheet.

## 5 Ausblick

Die berechneten Energieverbräuche in den Modellen der Wärmeöfen können anhand der spezifischen Heizwerte für Erd- und Hochofengas in Gasverbräuche transfor-

miert und durch Multiplikation der Beschaffungs- bzw. Opportunitätskosten der Gase anschließend monetär bewertet werden. Das vorliegende Modell ermöglicht somit die Evaluation unterschiedlicher Gestaltungsalternativen hinsichtlich der betriebswirtschaftlichen Effizienz der Wärmeöfen. Die entscheidungsorientierte Bewertung des gesamten Logistiksystems, z.B. durch Berechnung der Energiekosten der Krane anhand Heinen'scher Verbrauchsfunktionen und durch Berücksichtigung der Personal- und Kapitalbindungskosten kann hier jedoch nicht vertieft werden (vgl. LABITZKE u.a. 2009, S. 2500 ff.).

Der hier vorgestellte Ansatz einer Verknüpfung der Ablaufsimulation mit betriebswirtschaftlichen Bewertungskalkülen geht über die bisher in der Literatur diskutierten Ansätze der Kostensimulation hinaus. Letztere basieren fast ausschließlich auf aktivitätsorientierten, meist vollkostenorientierten Rechnungssystemen und zielen in erster Linie darauf ab, analytisch vorbestimmte Kosten möglichst gerecht auf Kostenträger, Ressourcen oder Aktivitäten zu verteilen (für einen Literaturüberblick siehe LABITZKE u.a. 2009, S. 2498 f.). Zur Gestaltung logistischer Prozesse bei der Stahlherstellung ist ein solches Vorgehen wenig zielführend. Hier sind die Energiekosten zu bedeutend, um sie im Kleid unechter Gemeinkosten pauschal zu verrechnen. Durch Nutzung technischer Verbrauchsfunktionen in hochauflösenden dynamischen Ablaufsimulationen lassen sich die Energiekosten endogenisieren und gegenüber analytischen Rechnungsansätzen wesentlich detaillierter darstellen. Dies ist die Quintessenz des hier vorgestellten neuartigen Ansatzes: Erst die Endogenisierung der Verbrauchs- und Kostenberechnung hebt die Kostensimulation qualitativ von analytischen Bewertungsansätzen für die logistische Prozessgestaltung ab. Die Proportionalisierung vorab festgesetzter Kostenhöhen schafft – abgesehen von der Bestimmung von Stückkosten für die Produktkalkulation – für die Entscheidungsunterstützung dagegen wenig Mehrwert.

## Literatur

- ASSAF, I.; CHEN, M.; KATZBERG, J.: Steel production schedule generation. In: *International Journal of Production Research*, Oxfordshire, 35(1997)2, S. 467-477.
- LABITZKE, Niklas; SPENGLER, Thomas S.; VOLLING, Thomas: Applying decision-oriented accounting principles for the simulation-based design of logistics systems in production. In: *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference; Energy Alternatives*. Hrsg.: Rossetti, M. D.; HILL, R. R.; JOHANSSON, B.; DUNKIN, A.; Ingalls, R. G. New York, NY: Association for Computing Machinery Order Department; Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 2009, S. 2496-2508.
- RABE, Markus; SPIECKERMANN, Sven; WENZEL, Sigrid: *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik*. Berlin: Springer-Verlag, 2008.
- VOIGT, Hans; BULLERSCHEN, Klaus-Gerd; FRIEDRICH, Reiner: Untersuchungen zum Heißtransport von Stranggußbrammen. In: *Stahl und Eisen*, Düsseldorf, 110(1990)6, S. 97-105.