

*Simulation in Produktion und Logistik 2023*  
*Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)*  
*Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023*  
*DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476*

# **Entwicklung und Realisierung einer Modellbibliothek für ein Entscheidungsunterstützungssystem in der Kalksandsteinproduktion**

***Development and Realisation of a Model Library for a Decision Support  
System in Calcium Silicate Brick Production***

Tobias Schrage, Peter Schuderer,  
TH Ingolstadt, Ingolstadt, Germany  
{tobias.schrage, peter.schuderer}@thi.de

Martin Barth, Jörg Franke  
Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS),  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Erlangen, Germany  
{martin.barth, joerg.franke}@faps.fau.de

**Abstract:** The digitization in the context of the fourth industrial revolution provides new opportunities for value chains and the optimal design of production. Simulation is discussed as a valuable tool for production planning and control in cases where modeling and analysis require significant computational effort. Simulation helps determine production times and costs under varying buffer sizes, machine performance, cycle times, and batch sizes, as they are present for calcium silicate brick production. Meanwhile, energy is increasingly becoming a factor in the resource-oriented management of companies. In case of resource-oriented production planning and control is becoming a survival factor. Therefore, for a simulation-based decision support system for production planning in the calcium silicate brick industry, a model library for material flow simulation is extended and tested based on 5 reference plants.

## **1 Motivation und Problemstellung**

Die Digitalisierung bietet neue Möglichkeiten für Wertschöpfungsketten und die optimale Gestaltung der Produktion, unter dem möglichen Einsatz von Simulation zur Produktionsplanung und -steuerung (Wenzel 2018). Unter den Rahmenbedingungen von variierbaren Pufferdimensionierungen, Maschinenleistungen, Taktzeiten und Losgrößen unterstützt die Simulation bei der Ermittlung von Produktionszeiten und –kosten (Bracht et al. 2018). Zeitgleich werden die wirtschaftlichen Aktivitäten von

Unternehmen zunehmend durch den Wettbewerbsfaktor Energie in der ressourcenorientierten Steuerung von Unternehmen bestimmt (Dyckhoff 2018; Rackow et al. 2013). In der Herstellung des Baustoffs Kalksandstein (KS) treffen eine hohe Variantenvielfalt und chargenstützte, hybride Fertigungsprozesse auf einen jährlichen Energiebedarf von etwa 800 Gigawattstunden (GWh), womit die KS-Industrie für 0,7% aller industriebedingte Treibhausgasemissionen in Deutschland verantwortlich ist (Umweltbundesamt Mai 2021). Zusammenfassend besteht der ökologische wie ökonomische Handlungsbedarf darin, den Herstellungsprozess für KS produktiver und ressourcenorientierter zu gestalten, um somit die Herstellkosten nachhaltig zu reduzieren und die geforderte Klimaneutralität bis 2045 (Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V. 2021) zu erreichen. Entscheidungsunterstützungssysteme in der Produktionssteuerung dienen der Zielerreichung. Die verfügbaren finanziellen Mittel und das vorhandene Know-how in der von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) geprägten Branche erfordern eine aufwandsarme Integration. Eine Lösungsmöglichkeit mittels modularer Modellbibliothek wird am Beispiel der aufgeführten KS-Herstellung dargelegt.

## **2 Stand der Technik**

### **2.1 Simulationsgestützte Planung in der KS-Industrie**

Der Herstellungsprozess von KS besteht aus fünf Prozessschritten. Im ersten Schritt werden die gelagerten Rohstoffe Kalk, Sand, Wasser und Zuschlagstoffe nach einer sortenspezifischen Rezeptur dosiert und im Mischer vermengt. Anschließend löst der mit Wasser und Sand versetzte Branntkalk ( $\text{CaO}$ ) in einer exothermen Reaktion im Reaktor ab. Nach Abschluss dieses Vorgangs und Einstellung der Pressfeuchte werden die Rohlinge durch Pressen urgeformt. Anschließend werden sie in einer Wasserdampfatmosphäre autoklaviert, um die erforderliche Festigkeit zu erreichen. Nach dem Abdampfen werden die fertigen Steine in der Verpackungsanlage zu transportfähigen Steinpaketen gebündelt und schließlich eingelagert. Es handelt sich insbesondere um einen hybriden Produktionsprozess mit dem Übergang von Schüttgut zu Stückgut und stark schwankenden Taktzeiten.

Eine erste Konzeption eines Entscheidungsunterstützungssystem (engl. Decision Support System, DSS) für die KS-Produktion wurde von (Donhauser 2020) entwickelt. Das DSS basiert auf einer simulationsbasierten Integration von spezifischen Prozessen, thermodynamischen Zusammenhängen und produktivitätssteigernden Optimierungsansätzen in der KS-Produktion (Abbildung 1).

Eine praxistaugliche Realisierung und Validierung des bestehenden Konzeptes ist bisher nicht erfolgt und stellt den Forschungsbedarf vor der Entwicklung für den industriellen Einsatz dar. Vor dem geschilderten Hintergrund ist es das Ziel dieses Beitrags, ein simulationsgestütztes DSS für mehrere ausgesuchte KS-Werke zu realisieren, um eine Produktionsplanung und Energiebetrachtung mit geringem Bedien- und Implementierungsaufwand in der klein- und mittelständisch geprägten und kostenorientierten KS-Industrie zu entwickeln. Dazu müssen die digitalen Voraussetzungen in der KS-Produktion, eine effiziente, verifizierte und validierte Modellierung von KS-Werken sowie die Integration des DSS in die

Produktionssteuerung untersucht werden. Weiterhin sind bislang die Schritte zur Einführung eines DSS in KS-Werken nicht einheitlich definiert worden.

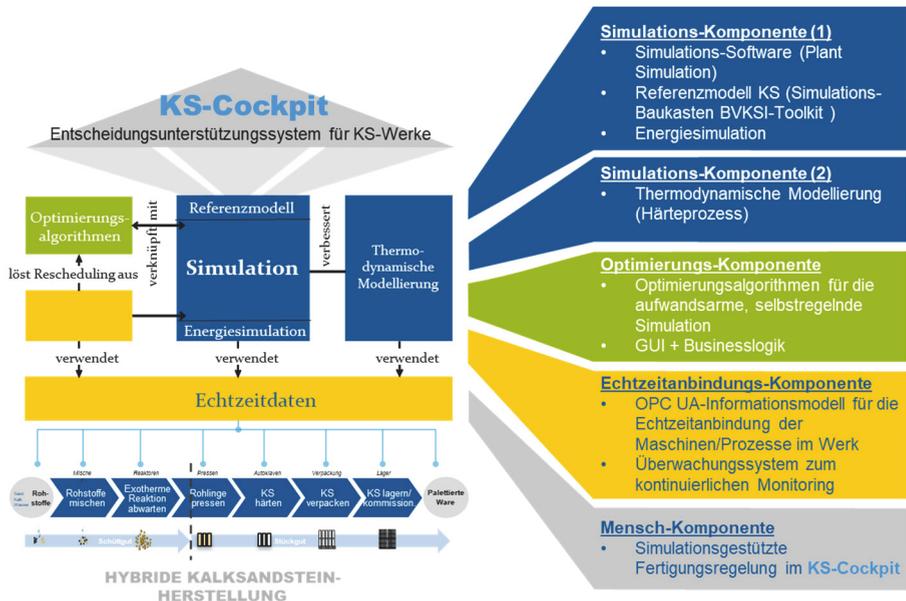


Abbildung 1: Die ressourcenorientierte Auftragsregelung im KS-Cockpit als Entscheidungsunterstützungssystem (DSS) i.A. an (Donhauser, 2020)

## 2.2 Ansätze zur simulationsbasierten Produktionsplanung und -optimierung

Forschungsansätze zur simulationsgestützten Produktionsplanung bringen eine Verknüpfung von analytischen Optimierungsverfahren und Discrete Event Simulation (DES) auf (Hanschke und Zisgen 2015; Claus et al. 2021; Donhauser 2020). Die Forschergruppe um Almeder und Gansterer (2021) legt hohen Wert auf eine schlanke und leistungsfähige Simulationsengine, um für einen operativen Einsatz der Simulation akzeptable Laufzeiten zu erreichen. Allerdings besteht in der Datenanbindung noch Forschungsbedarf und die Auswahl der abgebildeten nicht-linearen Zusammenhänge hat einen entscheidenden Einfluss auf den Optimierungsalgorithmus (Almeder und Gansterer, 2021).

Kück et al. (2016, 2017) entwickeln in diesem Kontext ein echtzeitbasiertes, simulationsgestütztes Optimierungsverfahren, um für einen aktuellen Produktionszustand optimale Priorisierungsregeln abzuleiten. Letztlich wird ein Simulationsmodell über eine MES-Schnittstelle an den realen Produktionszustand angepasst und einzig für die Bewertung von Ergebnissen eingesetzt. Eine Anpassung an ungeplante, spezifische Planabweichungen ist nicht vorgesehen und die Anbindung von Echtzeitdaten ist den Veröffentlichungen nur auf konzeptioneller Basis zu entnehmen (Kück et al. 2016, 2017).

Für einen kurzfristigen Planungshorizont im Kontext der Halbleiter- und Elektronikproduktion legen Klemmt et al. (2011) den Fokus auf eine Kombination automatisch generierter Simulationsmodelle mit prioritätsbasierten und exakten Lösungsverfahren unter Berücksichtigung von aktuellen Produktionsdaten. Die Neuplanung wird durch den Nutzer initiiert und basiert auf dem zuletzt in einer Datenbank abgelegten Produktionszustand, eine gesonderte Validierung aktueller Produktionsdaten findet dabei nicht statt (Klemmt et al. 2011). Ähnlich zur Autoklavierung in der KS-Herstellung werden Ofenprozesse mit Chargenbearbeitung simulationsbasiert optimiert, wobei fixe anstelle thermodynamikabhängiger Bearbeitungszeiten angesetzt werden.

Insgesamt ist die Betrachtung von Energieverbräuchen und -vorhersagen in Materialflusssimulationen stark anwendungsfallbezogen und branchenspezifisch (Kulus et al. 2011; Schacht und Mantwill 2012). Eine allgemeinere Methode zur Messung des Energieverbrauchs liegt in der Form eines Methodenbausteins für Tecnomatix Plant Simulation vor, welche über Modelländerungen hinweg funktional bleibt (Spreng et al. 2013).

### 3 Forschungs- und Projektergebnisse

Eine Definition der informationstechnisch abzubildenden Komponenten hat im Ergebnis des Projekts *Ressourcenorientierte Auftragsregelung hybrider Produktionen mittels betriebsbegleitender Simulation (ReProSi)* zu einem Baukastensystem (Donhauser et al., 2015) geführt und weiteren Forschungsbedarf detektiert. Die technischen Voraussetzungen in den KS-Werken sind nicht untersucht und müssen für die Einführung eines DSS vorbereitet werden. In einem ersten Schritt wird der Stand der Digitalisierung in der KS-Produktion analysiert und Fallstudienwerke ausgewählt. Im zweiten Schritt erfolgt die Werksmodellierung und die Analyse des weiteren Forschungsbedarfs aus der Differenz zwischen methodisch umsetzbaren Modellierungen und nach Expertenmeinung wesentlichen Abbildungen des realen Systemverhaltens. Der dritte Schritt umfasst die Anwendung und Integration des DSS entlang der ausgewählten Fallstudien sowie eine Verifikation und Validierung der entwickelten Modellbibliothek durch KS-Experten.

#### 3.1 Umfrage Digitalisierungscheck

Die Einführung eines DSS in Produktionssystemen setzt einen Digitalisierungsgrad voraus, die informationstechnischen Strukturen in der KS-Industrie erfordern eine vorherige Bestandsaufnahme. Mit einem Digitalisierungscheck wurde die Informations- und Technologieverfügbarkeit in der KS-Industrie erfasst und fünf teilnehmende Werke für die Validierung ausgewählt.

In Anlehnung an das Modell des Verbandes Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer (VDMA) für KMUs (Anderl; Fleischer, 2015) wurde in Zusammenarbeit mit der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V. ein Digitalisierungscheck adaptiert. An der Beantwortung der Fragestellungen haben 14 KS-Werke teilgenommen. Kern der Befragung waren Möglichkeiten der Datenaufnahme und -verarbeitung, Schnittstellen, sowie die Digitalisierung innerhalb der Produktionsplanung.

Zusammenfassend zeigt der Digitalisierungscheck, dass die Mehrzahl der teilnehmenden KS-Werken Produktionsdaten in allen Prozessstufen mit Ausnahme

der Reaktoren verarbeitet. Es erfolgen Speicherungen, Auswertungen zur Prozessüberwachung sowie automatische Prozesssteuerungen. Die Daten werden über Feldbusschnittstellen und Industrial Internet übertragen und überwiegend auf einem zentralen Datenserver gespeichert, sofern eine Datenspeicherung erfolgt. Dem Bedienpersonal steht an allen Prozessschritten ein lokales Anzeigergerät oder eine zentrale Produktionsüberwachung zur Verfügung. Die Auftragsplanung erfolgt überwiegend manuell in einer Tages- und Spontanplanung. Störungen werden an allen Prozessschritten überwiegend automatisch erkannt und manuell behoben. Die digitale Integration von Informationen aus der Produktionsperipherie, wie z.B. Auftragsdaten, findet selten Anwendung.

### 3.2 Modellbildung und Teilmodelle der KS-Werke

Auf Basis des durchgeführten Digitalisierungschecks werden unter Berücksichtigung der Datenverfügbarkeit, der System- und Steuerungsschnittstellen sowie der Verfügbarkeit eines auf die KS-Industrie übertragbaren Maschinen- und Anlagenparks fünf Fallstudienwerke für die Modellierung und Validierung der generischen und allgemeingültigen Modellbibliothek ausgewählt.

Basierend auf dem Vorgehensmodell zur Durchführung von Simulationsstudien nach (Rabe et al. 2008) wurden für die definierten KS-Werke spezifische Bausteine zur Modellierung des KS-Fertigungsprozesses mit der Simulationssoftware Plant-Simulation entwickelt. Zur Unterstützung der Modellierung wird das Gesamtsystem nach Submodellen in die einzelnen Fertigungsschritte untergliedert. Dazu zählen die Teilsysteme Mischer, Reaktoren und Pressen, Autoklaven und Verpackung, die in Abbildung 2 dargestellt sind.

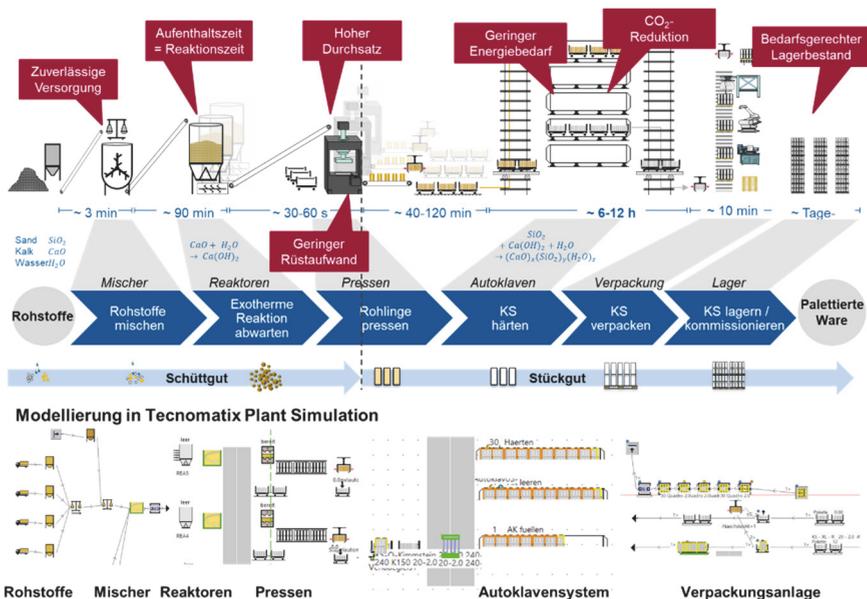


Abbildung 2: KS-Produktionsprozess und Modellbibliothek für effiziente KS-Werksmodellierung

Für die Parametrisierung der spezifischen Kalksandsteinwerke werden die erforderlichen Rohdaten von den Fallstudienpartnern bereitgestellt und in enger Zusammenarbeit für die Verwendung in der Simulation aufbereitet. Insgesamt lassen sich die benötigten Daten in Betriebsdaten, Prozessdaten und Produktdaten kategorisieren. Betriebsdaten beziehen sich dabei auf die Produktionssteuerung und Störungsabbildung. Prozessdaten umfassen statische und dynamische Größen von Maschinen und Anlagen. Dazu gehören Abmessungen und Volumina sowie Taktzeiten, Rüstzeiten und Verfügbarkeiten. Produktdaten definieren die Kalksandsteine einschließlich der Rohstoffzusammensetzung und bilden das Produktionsprogramm ab.

Für die Simulation der Energiemengen gehört die Ermittlung des elektrischen Verbrauchs zur Standardfunktionalität von Tecnomatix Plant Simulation, während der Gas- und Ölverbrauch sowie exotherme Reaktionen anderweitig modelliert werden müssen. Jedes Teilmodell sowie das Gesamtmodell werden anhand historischer Realdaten und Experteninterviews verifiziert und validiert.

Das Teilmodell Mischerei besteht ausschließlich aus Schüttgütern. Dieses Teilmodell beinhaltet die Simulation des Ressourcenverbrauchs je nach Rezeptur der im Produktionsprogramm hinterlegten Produkte. Das Teilmodell Reaktoren und Pressen modelliert den Energieverbrauch bei der exothermen Reaktion von Kalk, Sand und Wasser und modelliert den Übergang von Schüttgut zu Stückgut. Dazu wurde eine laufzeiteffiziente Modellierung des Übergangs von Schüttgut zu Stückgut integriert.

Das Teilmodell Verschiebebühne und Autoklaven modelliert die Produktionslogistik der Kalksandsteine zwischen den Pressen und den Autoklaven sowie den Härteprozess in den Autoklaven. Die Prozesszeit in den Autoklaven wird durch produktspezifische Härtekurven bestimmt, die im Simulationsmodell hinterlegt sind. Die Modellierung des Energieverbrauchs ist nicht trivial und unterliegt physikalischen thermodynamischen Wechselwirkungen.

Das Teilmodell Verpackung berücksichtigt die Palettierung und Bündelung, um die Produkte versandfertig zu machen.

Die beschriebenen Teilmodelle ermöglichen eine effiziente Werksmodellierung, bei der nur Anpassungen im Detail erforderlich sind. Das Projektteam hat für die Modellierung der Fallstudienwerke zwischen fünf und zehn Arbeitstage aufgewendet. Ein Zwischenergebnis besteht in der Erkenntnis, dass die Werksmodellierung aus einem Baukastensystem effizient durchgeführt werden kann, jedoch Anwender mit wenig Simulationserfahrung die Modellierung nicht eigenständig durchführen und ein Anwendungsfall für das Entscheidungsunterstützungssystem erst nach erfolgter Modellierung, Validierung und Implementierung in der Nutzung für die Werke der KS-Industrie besteht.

### **3.3 Einsatzmöglichkeiten der KS-Simulationsbibliothek**

Die beschriebene Modellbibliothek ermöglicht eine aufwandsarme Modellierung und Integration eines DSS in KS-Produktionssysteme. Die zu erreichenden Planungsziele sind in Abbildung 2 an den jeweiligen Prozessschritten aufgeführt und umfassen neben den gängigen ökonomischen und ökologischen Analysen und Optimierungen entlang der Prozesskette, insbesondere die Sicherstellung der Rohstoffversorgung der Mischer, der optimalen Belegung der Reaktoren entsprechend der chemischen

Reaktionszeit sowie die Minimierung des Energiebedarfs der Autoklaven durch Belungsoptimierung und Energiewiederverwendung.

Während Mischer und Reaktor mit Standardelementen modelliert werden können, sind insbesondere im Teilmodell Pressen und Autoklaven die Besonderheiten von chargengestützten und energieintensiven Produktionsprozessen zu berücksichtigen. Der Autoklavierprozess ist mit einer Dauer von bis zu 12 Stunden zudem der Taktgeber in der KS-Produktion. Die Pressen sind häufig nicht durch Puffer von den Autoklaven entkoppelt.

Im Pressenverbund ist ein Algorithmus zur Ermittlung der rüstzeitoptimalen Auftragsreihenfolge implementiert. Dabei werden die Aufträge zunächst nach ihrem Steinformat sortiert, um gleichartige Aufträge auf mehreren Pressen für den Betrachtungszeitraum auszuschließen. Anschließend wird die Rüstzeit pro Presse und Auftrag ermittelt. Eine Rüstzeitmatrix wird bei der Modellparametrisierung im Bereich der Produktionsdaten hinterlegt. Die Rüstzeit geht dann in die Presszeit des jeweiligen Auftrags ein. Rüstzeit und Presszeit gehen in eine Zielfunktion ein, mit der der Lösungsraum der möglichen Auftragsreihenfolgen bewertet wird. Der Auftrag mit dem niedrigsten Zielfunktionswert wird in einer zuvor automatisch erstellten Kopie des Simulationsmodells simuliert und anschließend in das Hauptmodell zurückgeführt. Der Zielfunktionswert setzt sich aus den gewichteten Komponenten Rüstzeit, Presszeit, Wartezeit Härtewagen, Härtezeit, Auslastung, Durchlaufzeit Autoklaven, Anzahl von fertiggestellten Autoklaven, Anzahl von fertiggestellten Verpackungseinheiten und Gesamtdurchlaufzeit zusammen. Entsprechende Gewichtungen sind parametrierbar. Aus den Einflussgrößen auf die Zielgröße ist bereits ersichtlich, dass eine analoge Erweiterung der Reihenfolgeoptimierung auf nachfolgende Prozessschritte in Weiterentwicklungen umgesetzt werden kann.

Im Bereich des Autoklavierprozesses werden verschiedene Strategien zur Beschickung der Autoklaven modelliert. Aufgrund der großen Unterschiede in der Zykluszeit zwischen Pressen (ca. 40-60 Sekunden) und Autoklaven (ca. 6-12 Stunden) produziert eine Presse für mehrere Autoklaven. Eine optimale Strategie kann als Kernproblem der Produktionssteuerung in der KS-Produktion angesehen werden. Sofern die Autoklaven mit gemischten Steinsorten beschickt werden, besteht die Entscheidungsmöglichkeit einer zyklischen oder schnellstmöglichen Beschickung. Sofern eine sortenreine Beladung der Autoklaven gewählt wird, muss eine Festlegung über das Entscheidungskriterium der Sortenreinheit nach Steinsorte, Steinformat, Härtekurve oder Verpackungsform gewählt werden. Eine algorithmische Optimierung dieses Prozessschrittes ist derzeit noch Gegenstand der Forschung.

Ein wesentlicher Aspekt bei der Herstellung von KS ist, wie bereits erwähnt, die Entscheidungsgröße Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Einsparung. Während die Simulation des elektrischen Energieverbrauchs bereits beschrieben wurde, kann das energieintensive Dampfsystem zur Autoklavierung der Kalksandsteine überwiegend mit den fossilen Brennstoffen Gas und Heizöl betrieben werden. Zur Ermittlung des Energieverbrauchs mittels Simulation ist eine thermodynamische Modellierung des Dampf- und Autoklavensystems erforderlich. Aktuelle Ansätze schlagen eine Kombination mit analytischer Beschreibung und mathematischer Optimierung oder die Integration von Strömungssimulation als hybride Simulation vor (Donhauser, 2020). Auf Grundlage der verwendeten objektbasierten Simulation sind die Informationsträger an das Simulationsobjekt Kalksandstein geknüpft. Letztlich liegt

keine abschließende physikalisch-thermodynamische Modellierung des Härteprozesses von Kalksandsteinen vor (Eden; Steinmann 2010), was eine Modellierung für den vorliegenden Anwendungsfall erschwert.

Für den Anwendungsfall der Ermittlung von Steuerungsparametern für eine energieoptimierte Produktion werden in der heutigen KS-Produktion die Autoklaven in der An- und Abfahrphase zusammenschaltet, um eine Wiederverwendung des Dampfes zu ermöglichen. Diese Steuerungsunterstützung basiert auf Erfahrungswissen und droht aufgrund des Fachkräftemangels in Zukunft zu entfallen. Eine Modellierung des Autoklavierprozesses sowie des Verhaltens eines Autoklavensystems ist Voraussetzung für die Integration von Optimierungslösungen in ein Entscheidungsunterstützungssystem. Anschließend können Optimierungen in der KS-Fertigung ermittelt werden. Die Modellierung des Aushärteprozesses und des Verhaltens im Autoklavensystem stellt einen aktuellen Forschungsbedarf dar.

Erste Modellrechnungen mit den ausgewählten Kalksandsteinwerken ergeben eine mögliche Energieeinsparung durch die optimierte Steuerung eines Systems aus mehreren Autoklaven zur Dampfwiederverwendung um 20%. Bezogen auf den aktuellen Gaspreis von 0,10€/kWh (Stand März 2023) ist mit einer Einsparung von bis zu 2,0€ pro Tonne und 16 Mio. € pro Jahr über alle Werke der Kalksandsteinindustrie in Deutschland zu rechnen. Derzeitige Ergebnisse beziehen sich auf Entscheidungen zur Beladungsreihenfolge der Autoklaven. Ein Optimierungsalgorithmus mit der Zielgröße Energieverbrauch stellt weiteren Forschungsbedarf.

Die durchgeführten Experteninterviews mit den ausgewählten KS-Werken bestätigen die Notwendigkeit der aufgeführten Punkte und den Nutzen des modularen Simulationsbausteinbaus sowie des Entscheidungsunterstützungssystems für die Produktionssteuerung und bekräftigen insbesondere drei zentrale Anwendungsfälle.

1. Reaktion auf Störungen und Anlagenausfälle
2. Optimierung der Produktionsprogrammplanung zur Produktivitätssteigerung
3. Ermittlung von Steuerungsparametern für energieoptimale Produktion

Nach erster Anwendung des Baukastens auf die Produktionsplanung der Kalksandsteinwerke konnte eine Produktivitätssteigerung der Autoklaven durch die optimierte Gestaltung des Produktionsplans mit Hilfe des simulationsgestützten DSS um 30% realisiert werden, indem Produktionspläne mittels oben beschriebenem Optimierungsalgorithmus zur Reduzierung von Rüstzeiten im Prozessschritt Pressen ermittelt wurden.

## **4 Zusammenfassung und Ausblick**

Der vorliegende Beitrag gliedert sich in die Entwicklung und Realisierung einer Modellbibliothek für ein DSS zur ressourcenorientierten Produktion von Kalksandsteinen. Bevor eine erfolgreiche und aufwandsarme Integration eines DSS in den KS-Werken erfolgen kann, ist eine detaillierte Auseinandersetzung mit verfügbaren Daten und Schnittstellen mittels Digitalisierungsscheck erforderlich.

Es liegt eine Modellbibliothek mit spezifischen Teilmodellen zur Modellierung von KS-Produktionen vor. Dabei sind allgemeingültige Maschinen- und Anlagen in ihrer logistischen und energetischen Verknüpfung modelliert. Optimierungsalgorithmen für die Produktionsprogrammplanung auf Entscheidungsbasis von Rüstzeiten wurden

ebenfalls integriert und durch erste Nutzung mit ausgewählten KS-Werken qualitativ validiert. In weiteren Forschungstätigkeiten ist die Optimierung der Energiebetrachtung insbesondere in den Autoklavensystemen zu erweitern. Nichtlineare Abhängigkeiten von thermodynamischen Wechselwirkungen erfordern eine Lösungsintegration von analytischen Modellen, hybrider Simulation oder der Integration Künstlicher Intelligenz (KI).

Zusätzlich zu den bisherigen Modellversuchen mit ausgewählten KS-Werken soll in einer zweiten Validierungsphase eine größere Gruppe von Fallstudien ausgewählt werden. Weiterhin ist die Adaption der entwickelten Lösungen auf ähnliche hybride Produktionen in der Herstellung von Baustoffen, Komposit-Materialien und Lebensmittelindustrie zu validieren.

## Literatur

- Almeder, C.; Gansterer, M.: Robuste operative Planung. In: Claus, T.; Herrmann, F.; Manitz, M. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler 2021, S. 63–78.
- Anderl, R.; Fleischer, J.: Leitfaden Industrie 4.0: Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand. Unter Mitarbeit von Beate Stahl, 2015,
- Bracht, U.; Geckler, D.; Wenzel, S.: Digitale Fabrik: Methoden und Praxisbeispiele. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2018.
- Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V. (2021): Roadmap für eine treibhausgasneutrale Kalksandsteinindustrie in Deutschland: Eine Studie für den Bundesverband Kalksandsteinindustrie e. V., von FutureCamp Climate GmbH.
- Claus, T.; Herrmann, F.; Manitz, M. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung: Forschungsansätze, Methoden und Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler 2021.
- Donhauser, T.: Ressourcenorientierte Auftragsregelung in einer hybriden Produktion mittels betriebsbegleitender Simulation. Erlangen, FAU University Press, Dissertation, 2020.
- Donhauser, T.; Eden, W.; Franke, J.; Jung, T.; Schuderer, P.: Entwicklung einer Methodik zur ressourcenorientierten Steuerung der Werksprozesse in der Kalksandstein-Industrie: „KS-Sim“. Hannover 2015.
- Dyckhoff, H.: Produktion und Umwelt. In: Corsten, H.; Gössinger, R.; Spengler, T. (Hrsg.): Handbuch Produktions- und Logistikmanagement in Wertschöpfungsnetzwerken. Berlin: DeGruyter 2018, S. 949–975.
- Hanschke, T.; Zisgen, H.: Verknüpfung von Simulation und Optimierung: Kategorien und Beispiele – Ein Bericht über die VDI Richtlinie 3633 Blatt 12. In: Rabe, M.; Clausen, U. (Hrsg.): Simulation in production and logistics, Dortmund, 2015, S. 111–118.
- Klemmt, A.; Horn, S.; Weigert, G.: Simulationsgestützte Optimierung von Fertigungsprozessen in der Halbleiterindustrie. In: März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G. (Hrsg.): Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2011, S. 49–63.
- Kück, M.; Becker, T.; Freitag, M.: Emergence of Non-predictable Dynamics Caused by Shared Resources in Production Networks. *Procedia CIRP* 41 (2016), S. 520–525.

- Kück, Mirko, Boda, Eike; Freitag, M.: Toward adaptive simulation-based optimization to select individual dispatching rules for production control. In: Chan, Wai Kin et al. (Hrsg.): Winter Simulation Conference: 2017 Winter Simulation Conference : WSC turns 50: simulation everywhere! : December 3-6, 2017, Red Rock Casino Resort & Spa, Las Vegas, NV, Las Vegas, NV, 2017,
- Kulus, D.; Wolff, D.; Ungerland, S.; Dreher, S.: Energieverbrauchssimulation als Werkzeug der Digitalen Fabrik. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 106 (2011) 9, S. 585–589.
- Rackow, T.; Schuderer, P.; Franke, J.: Green Controlling - Ressourcenorientierte Steuerung von Unternehmen. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 108 (2013) 10, S. 773–777.
- Schacht, M.; Mantwill, F.: Unterstützung des Planungsprozesses im Karosseriebau durch Energieverbrauchssimulation 107 (2012) 4, S. 207–211.
- Spreng, S.; Kohl, J.; Franke, J.: Automatisierte Erweiterung bestehender Materialflusssimulationen durch Energieaspekte. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 108 (2013) 9, S. 647–651.
- Umweltbundesamt (Mai 2021): Treibhausgasemissionen 2020: Emissionshandlungspflichtige stationäre Anlagen und Luftverkehr in Deutschland (VET-Bericht 2020).
- Wenzel, S.: Simulation logistischer Systeme. In: Tempelmeier, H. (Hrsg.): Modellierung logistischer Systeme. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2018, S. 2–32.