

# **Verfolgung von Bauteil- und Anlagentemperaturen in Produktionssystemen zur Energiesimulation bei thermischen Einflussfaktoren**

## ***Tracking of Workpiece and Equipment Temperatures in Production Systems for Energy Simulation with Thermal Impact Factors***

Toni Donhauser, Lukas Baier, Technische Hochschule Ingolstadt, Ingolstadt  
(Germany), toni.donhauser@thi.de, lukas.baier@thi.de

Andreas Mayr, Jörg Franke, FAU Erlangen-Nürnberg (Lehrstuhl FAPS), Erlangen  
(Germany), andreas.mayr@faps.fau.de, joerg.franke@faps.fau.de

**Abstract:** Simulation is a powerful tool for optimizing energy consumption in manufacturing plants. This paper presents a methodology on how to precisely model the logging of temperature curves of workpieces and machinery in a material flow simulation based on a structured measurement value acquisition. Using Newton's cooling law and regression curves, individual formulas are implemented for all relevant influencing factors, calculating and logging the temperature curves in the simulation according to the situational conditions. The suitability of this energy simulation methodology is validated by means of a case study in a real calcium silicate masonry plant and can be transferred to any other production.

## **1 Ausgangssituation**

Getrieben durch die Energiewende in Deutschland und anhaltende Nachhaltigkeitsbestrebungen (Müller et al. 2009) sehen sich Unternehmen zusehends damit konfrontiert, Produktionsentscheidungen mit gesteigertem Fokus auf einen effizienten Energieeinsatz zu treffen. Ein probates Hilfsmittel für Entscheidungen im Umfeld der Produktion stellt allgemein die ereignisdiskrete Simulation dar. Um diese um energetische Einflussfaktoren zu erweitern, ist jedoch ein hoher Aufwand, angefangen bei der Aufnahme von Daten bis hin zur Formalisierung und Implementierung im Simulationsmodell, erforderlich.

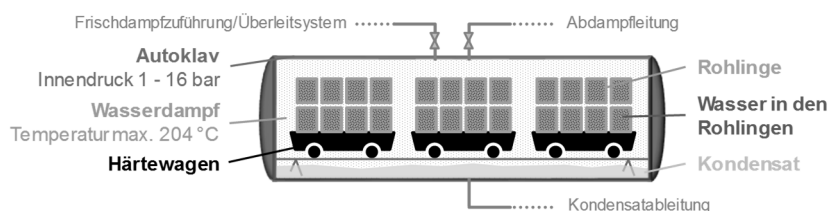
Eine Energiesimulation zielt im Regelfall darauf ab, das energetische Verhalten des Systems als zusätzliches Simulationsergebnis zu erhalten, um daraus im Nachgang Ansätze für energetische Optimierungen abzuleiten (Roemer und Steffen 2016). Teils erfordern Simulationsroutinen auch den direkten Einbezug energetischer Faktoren, da je nach Ausprägung derer das Verhalten der simulierten Objekte (z. B. Pfad, Geschwindigkeit, Bearbeitungszeit) variiert, beispielsweise wenn Prozesse nur bei

Verfügbarkeit von ausreichend regenerativer Energie gestartet oder deren Bearbeitungszeit von thermischen Größen determiniert werden.

In diesem Themenfeld stellt der vorliegende Beitrag eine Methodik vor, wie thermische Eigenschaften von Bauteilen und Anlagen in einer Ablaufsimulation berücksichtigt werden können. Aufbauend auf der Konkretisierung der Problemstellung anhand eines Fallbeispiels sowie der Aufbereitung des Stands der Wissenschaft wird die Methodik, beginnend mit der Identifizierung relevanter Einflüsse bis hin zu geeigneten Messverfahren, deren Auswertung und Modellierung, dargelegt und validiert.

## 2 Problemstellung

Thermische Einflüsse auf materialflussrelevante Produktionsentscheidungen sind auch bei der Fertigung von Kalksandsteinen (KS) zu beobachten. Da der Härteprozess in Autoklaven (siehe Abb. 1) immensen thermodynamischen Einflüssen unterliegt, kann für ihn in der Simulation keine vorab festgelegte Bearbeitungszeit angesetzt werden. Sie ergibt sich vielmehr durch das Zusammenwirken verschiedenster Einflussfaktoren, welche exemplarisch in Tabelle 1 aufgelistet sind.



**Abbildung 1:** Autoklav zur Härterung von Kalksandsteinen

Diese Einflussfaktoren sind zum Teil steuerbar, zum Teil nur indirekt steuerbar und teils nicht steuerbar. Entsprechend gilt es, sie in der Simulation zu berücksichtigen beziehungsweise sie als auf den Simulationslauf einwirkende Parameter einzusetzen. Indirekt steuerbar sind Faktoren dann, wenn sie nicht durch direktes Einwirken, jedoch durch Veränderung anderer Parameter anpassbar sind.

Die Modellierung des Härteprozesses selbst soll nicht Bestandteil dieser Veröffentlichung sein. Der Fokus liegt vielmehr auf dem Input für diesen Prozess. Insbesondere für die indirekt steuerbaren Einflussfaktoren, die Ausgangstemperaturen der Autoklaven selbst sowie der zugeführten Rohlinge, ist die Simulation von hoher Relevanz, da sie deren Beeinflussung durch Veränderungen bei beliebigen Parametern quantifizieren kann. Diese indirekt steuerbaren Faktoren variieren je nach Benutzung, Einstellung und Durchlauf der Objekte durch die vorgelagerten Produktionsschritte.

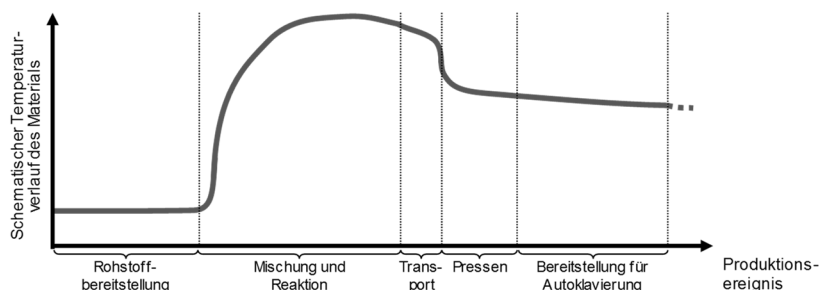
So wird durch das Vermengen der Rohstoffe Branntkalk und Wasser beim Mischvorgang mit verschiedenen Sanden eine exotherme Reaktion ausgelöst, die im Gemisch Wärmeenergie freisetzt, sodass die Temperatur des Gemischs auf einen Wert zwischen 60 - 80 °C ansteigt. Aufgrund der einhergehenden Volumendehnung ist eine Reaktionszeit von etwa 1,5 h abzuwarten, bevor das Gemisch zu Rohlingen gepresst wird. Diese werden auf Hartewagen gestapelt und nach einer bestimmten Anzahl von

Pressenhüben per Schiebebühne zu den Autoklaven transportiert. In Abhängigkeit der Aufenthaltsdauer in den unterschiedlichen Produktionsbereichen sowie der Form des Materials (Oberfläche gegenüber der Umgebung) kühlt das Material in unterschiedlicher Geschwindigkeit aus (vgl. Abb. 2).

**Tabelle 1:** Einflussfaktoren auf die Bearbeitungszeit im Härteprozess

Einflussfaktoren	steuerbar	indirekt steuerbar	nicht steuerbar
Ausgangstemperatur der Rohlinge		●	
Rohdichte der Steine	●		
Anzahl eingesetzter Autoklaven	●		
Ausgangstemperatur der Autoklaven und Härtevägen		●	
Dampfüberleitungsstrategien	●		
Umgebungstemperatur			●
Abrufbare Leistung des Dampferzeugers			●

Die Temperatur der Autoklaven – wie auch der Härtevägen – hängt von deren Benutzungzeitpunkten, Zustand und Isolation ab. Im Betrieb weist der Kessel in etwa eine Temperatur von 200 °C auf. Sobald der Härtevorgang beendet ist und der Dampf abgelassen bzw. übergeleitet wird, kühlt der Kessel aus. Die Abkühlgeschwindigkeit hängt neben der Umgebungstemperatur von der Beladung sowie der Öffnung der Türen ab.



**Abbildung 2:** Schematischer Verlauf der Materialtemperatur in der KS-Produktion

Um schließlich die Bearbeitungsdauer sowie den erforderlichen Energieeintrag beim Härteprozess möglichst exakt in Abhängigkeit verschiedener Einflussfaktoren bestimmen zu können, sind die Temperaturen der Rohlinge sowie der Autoklaven beim Start des Härtevorgangs zu ermitteln. Da sie abhängig von der vorangegangenen Prozessierung und Benutzung variieren, sind alle Temperatursteigerungen und -abfälle im Laufe der Simulation kontinuierlich zu verfolgen.

### **3 Simulation von Energieflüssen in Produktionssystemen**

Energieflusssimulationen mit Bezug auf Produktionssysteme werden meist durch zusätzliche, individuelle Implementierungen innerhalb bestehender Materialfluss-Simulationstools umgesetzt (Seewaldt und Bracht 2017), da ein enger Zusammenhang zwischen Materialflussverhalten und Energiebedarfen besteht (Wenzel et al. 2018). Für den Einbezug elektrischer Energie existieren gröbere Ansätze mittels Leistungsaufnahme-Mittelwerten über einen gewissen Zeitraum (Wolff et al. 2012), detailliertere mittels polynomial approximierten Leistungsaufnahme-Verläufen (Junge 2007) bis hin zu sehr detaillierten Methoden, die aufgezeichnete Lastverläufe zustandsabhängig exakt verfolgen (Kohl 2016).

Aufgrund der hohen Zahl an Einflüssen auf thermodynamische Systeme und aufgrund nicht eindeutiger Systemgrenzen in der Realität stellt sich eine exakte Messung thermischer Energieflüsse im Vergleich zu elektrischem Strom als herausfordernder dar. Gleiches gilt für deren Integration mit hohem Detailgrad in ein Simulationsmodell. So gibt es, abgesehen von ungenaueren Ansätzen beispielsweise auf Basis aggregierter Daten aus Energieaudits (Solding und Thollander 2006) oder mit gemessenen Verbrauchsmittelwerten (Thiede 2012), forschungsseitig exaktere Implementierungen in Simulationswerkzeugen, welche auf einer physikalischen Modellierung teils auch mit Differentialgleichungen beruhen. Einige Forschungsansätze greifen dazu auf hybride Simulationen zurück, die ereignisdiskrete Materialflusssimulationen mit spezifischen Simulationswerkzeugen (z. B. Computational Fluid Dynamics (CFD), multiphysikalische Simulation) koppeln (Peter et al. 2017; Schlüter et al. 2017). Auch in Fällen wie diesen gilt es zu prüfen, ob die zusätzliche Modellierung des kontinuierlichen Systemverhaltens durch die erhöhte Genauigkeit einen Mehrwert erzielt, der den zusätzlichen Aufwand rechtfertigt.

Um Temperaturverläufe von Materialien und Anlagen in einem Produktionsprozess über den Prozessverlauf modellieren zu können, sind stets spezifische Charakteristika des Produktionssystems sowie der Materialien zu berücksichtigen. Entsprechend wird im Folgenden eine übertragbare Methodik vorgestellt, die für jeden beliebigen Anwendungsfall die Modellierung und Implementierung der thermischen Eigenschaften ermöglicht.

### **4 Methodik zur Verfolgung von Bauteil- und Anlagentemperaturen**

Zur kontinuierlichen Verfolgung der Temperaturverläufe von Materialien und Anlagen über den Prozessverlauf sind deren Gesetzmäßigkeiten im Simulationsmodell zu implementieren. Hierzu stellte sich in Vorarbeiten (Mayr et al. 2019) das Newtonsche Abkühlungsgesetz für Abkühlprozesse sowie eine Annäherung von Messungen mit einem Polynom zweiten Grades für Temperatursteigerungen als geeignet heraus. Um diese Verläufe realitätsnah nachzubilden, sind einige Schritte erforderlich:

1. Identifikation relevanter Betrachtungsobjekte und deren Einflussgrößen
2. Messung: Auswahl geeigneter Messinstrumente, -zyklen und -szenarien sowie Aufbereitung der Messdaten

3. Interpretation: Verknüpfung von Betriebsabläufen und Anlagenzuständen mit erfassten Messwerten; Formalisierung der erfassten Temperaturverläufe
4. Modellierung: Integration der Berechnungsformeln, Implementierung von Attributen für die Formel-Parametrierung und Auswertung der Verläufe

Die genannten Schritte werden im Folgenden, angelehnt an einer hybriden Fertigung, d. h. der Prozessierung von Schüttgut und Stückgut, am Beispiel der KS-Herstellung erläutert. Das verwendete Simulationsmodell basiert auf einer validierten Modellierung für die Materialflüsse in KS-Werken mit Berücksichtigung der thermodynamischen Zusammenhänge im Härteprozess (Donhauser et al. 2016; Donhauser et al. 2015a; Donhauser et al. 2015b). Die aufgezeigte Methodik lässt sich in die Vorgehensweise bei einer Simulationsstudie nach VDI 3633-1 in die Phasen Systemanalyse bis Implementierung eingliedern (siehe dazu 4.1 bis 4.4).

### 4.1 Identifikation relevanter Einflüsse

In einem ersten Schritt ist der Untersuchungsrahmen zu definieren. Hierzu sind alle Einflussfaktoren und betroffenen Objekte zu identifizieren, die auf die in der Simulation zu erreichende Zielstellung einwirken. Sind thermische Eigenschaften von Objekten oder bestimmte Produktionsbereiche nicht entscheidend für die vorzunehmenden energetischen Untersuchungen, so müssen diese in der Simulation nicht gesondert betrachtet werden.

Abbildung 3 stellt einen geeigneten Ablauf zur Herleitung der relevanten Einflussfaktoren dar. Ausgehend von den Zielvorgaben mit Energiebezug ist der Betrachtungsbereich auf diejenigen Werkstoffe und Betriebsmittel einzuschränken, die diese Ziele beeinflussen. Für jedes Element dieses Betrachtungsbereichs sind wiederum alle Zustandsgrößen zu bestimmen, die den Energiebedarf respektive die enthaltene Energie determinieren. Jede dieser Größen ergibt sich in Abhängigkeit verschiedener Einflussfaktoren. Diese sind zu ermitteln, um für jede von ihnen im Prozessverlauf angenommene Ausprägung die Zustandsgrößen messen zu können. Im Simulationslauf stellen diese Einflussfaktoren die Variablen dar, die zur Einstellung verschiedener energetischer Szenarien variiert werden können.

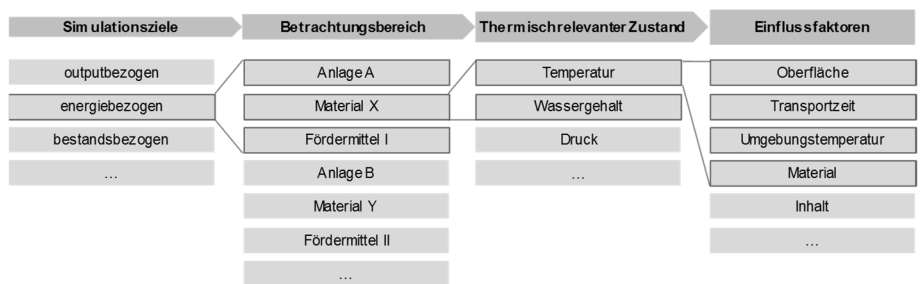


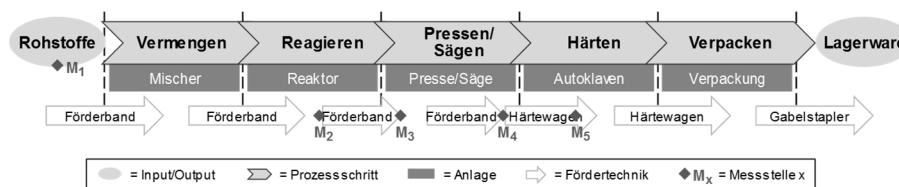
Abbildung 3: Ableitung der Einflussfaktoren ausgehend von den energiebezogenen Simulationszielen

### 4.2 Vorgehen zur Messung von Temperaturverläufen

Als Messinstrumente für die Erfassung von Temperaturwerten können für stationäre Messungen einfache Tauch- und Oberflächenfühler für Schütt- respektive Stückgut

eingesetzt werden. Soll eine kontinuierliche Messung durchgeführt werden, so können mobile Messsonden eingesetzt werden. Diese müssen sich jedoch für den Anwendungsfall eignen und an geeigneter Stelle wieder vom Material entfernt werden. Bei der KS-Herstellung kann beispielsweise nicht sichergestellt werden, dass eine solche Sonde vor dem Pressvorgang entdeckt und entnommen wird.

Können Zustandsgrößen wie Temperatur oder Wassergehalt aufgrund der räumlichen Gegebenheiten oder aus technologischen Gründen nicht kontinuierlich gemessen werden, so sind geeignete Messstellen festzulegen. Diese sollten an Orten gewählt werden, an denen sich Einflussfaktoren maßgeblich ändern. So verändert beispielsweise Schüttgut nach Ausgabe aus einem Behälter beim Auftreffen auf einem Förderband sowohl seine Oberfläche (bei Betrachtung als Charge) als auch den Aufenthaltsort. Demnach kann die Umgebungstemperatur variieren wie auch die Transportzeit in Abhängigkeit verschiedener Geschwindigkeiten des Förderbands. Geeignete Messstellen für den KS-Herstellungsprozess, die auch bei der Validierung der vorgestellten Methodik herangezogen werden, sind in Abbildung 4 aufgeführt.



**Abbildung 4:** Geeignete Messstellen im KS-Herstellungsprozess bei Vorliegen von üblicher Fördertechnik für die Schütt- und Stückgüter

Für die Aufnahme von Messreihen wurden im Testszenario zu Validierung der Methodik an jeder Messstelle für jede Parameterkombination (z. B. Umgebungstemperatur, Aufenthaltsdauer und Materialart) 30 Messwerte festgehalten, um den Stichprobenfehler in der Datenbasis zu minimieren. Um nicht jede potenzielle Parametereinstellung individuell messen zu müssen, sondern beispielsweise mittels Regression Abhängigkeiten zwischen Parametern zu bestimmen, sind geeignete Messszenarien zu wählen. Hierzu empfehlen sich einzelne Parametereinstellungen, die über das gesamte Prozessspektrum verteilt sind (vgl. „Design of Experiments“ (DoE)).

### 4.3 Interpretation der aufgenommenen Messwerte

Nach der Aufbereitung der erfassten Messwerte zur Vereinheitlichung und Weiterverarbeitung sind sie mit Informationen zum zugehörigen Betriebsablauf zu verknüpfen. Hierbei ist neben den zum Messzeitpunkt vorliegenden Ausprägungen aller Einflussfaktoren, die sich auf den jeweiligen Messwert beziehen, auch der demselben Material zuzuordnende Messwert an der vorangegangenen Messstelle zu verknüpfen, um Aussagen über die Temperaturentwicklung treffen zu können.

Über die Ausgangstemperatur  $T_0$  an Messstelle  $M_i$  und die Materialtemperatur  $T(t)$  bei  $M_{i+1}$  zum Zeitpunkt  $t$  können nun unter Einbezug der Umgebungstemperatur  $T_U$  durch Umstellung der Formel für das Newtonsche Abkühlungsgesetz

$$T(t) = (T_0 - T_U) \cdot e^{-\alpha_{M_i, M_{i+1}} t} + T_U \quad (1)$$

einzelne Abkühlungsraten  $\alpha_{M_i, M_{i+1}}$  für den betrachteten Messbereich  $[M_i, M_{i+1}]$  und die vorliegenden Einflussgrößen (z. B. Materialart, Transportmenge) berechnet und diese für die Verwendung in der Simulation gemittelt werden. Die Einflussfaktoren Transportzeit und Umgebungstemperatur sind bereits in der Formel enthalten, während die Materialoberfläche im Regelfall über die Abgrenzung der Messbereiche berücksichtigt ist.

Analog gestaltet sich das Verfahren für Prozesse mit Temperaturzunahme (z. B. exotherme Reaktion von Kalk und Wasser nach dem Mischen der Rohstoffe bei der KS-Herstellung), wobei anstelle einzelner Abkühlungsraten individuelle Regressionsfunktionen zweiten Grades für die Messreihen ermittelt werden. Werden die Temperaturkurven von Anlagen betrachtet, so sind spezifische Abkühlungsfaktoren oder Aufheizfunktionen für die jeweiligen Betriebszustände der Anlagen zu ermitteln. Für die Autoklaven bei der KS-Herstellung stellen beispielsweise die Anzahl der geöffneten Türen bei der Be-/Entladung unterschiedliche Betriebszustände dar, da dadurch die Abkühlung maßgeblich beeinflusst wird.

#### 4.4 Modellierung und Implementierung der Temperaturverläufe

Für jedes Objekt ist in dessen Attributen der Zeitpunkt und Ort der letzten Temperaturanpassung, die dort errechnete Temperatur sowie weitere bestimmende Faktoren für die Auswahl des Abkühlungsfaktors oder der Regressionsfunktion zu hinterlegen. Die Temperaturanpassung erfolgt anhand von Methoden in den Objekten, die die realen Messstellen repräsentieren. Diese Methoden beinhalten die Berechnungsfunktionen, die ihre determinierenden Parameter aus den Attributen der enthaltenen Elemente (z. B. Materialart) oder hinterlegten Tabellen (z. B. Abkühlungsrate) beziehen. Bei der Aktualisierung der Temperatur werden die Werte in den Attributen der Objekte überschrieben. Zur nachträglichen Ergebnisauswertung werden die vorherigen Werte in Ergebnistabellen gespeichert.

Bei Betrachtung der Temperatur von Anlagen, lösen Betriebszustandsänderungen oder individuell angelegte Trigger die Aktualisierung der Anlagentemperatur aus. Die Aktualisierung der Temperatur erfolgt analog zu mobilen Objekten.

### 5 Validierung der simulierten Temperaturänderungen

Für die Validierung wurden sowohl das Aufheizverhalten des gemischten Rohmaterials als auch dessen Abkühlungsverlauf in einem Simulationsmodell für ein KS-Werk aufgezeichnet. Als Datenbasis fungieren Messreihen aus dem realen Werk, die gemäß der voran aufgezeigten Methodik im Simulationsmodell integriert wurden.

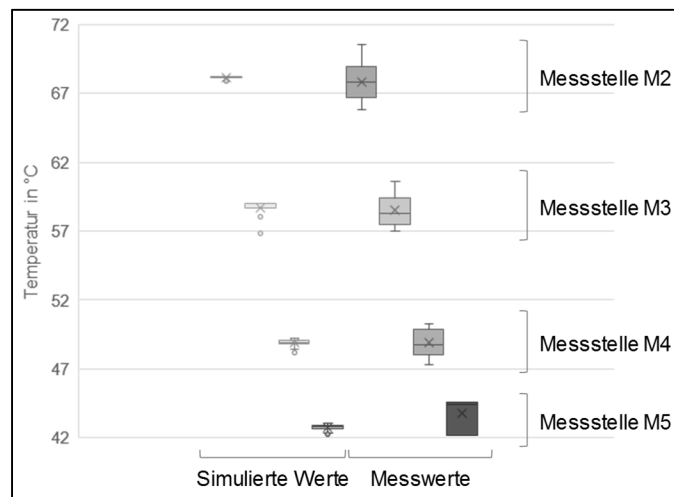
#### 5.1 Testscenario

In drei Produktionswochen wurden für verschiedene Fertigungslose mehrmals in regelmäßigen Abständen die Temperatur des Gemischs beim Eintritt in die einzelnen Betrachtungsbereiche gemessen, dieses Material weiterverfolgt und beim Austritt aus

dem jeweiligen Bereich erneut gemessen. Betrachtet wurde der Produktionsbereich von der Lagerung der Rohstoffe bis zur Bereitstellung der Rohlinge auf Härtewägen für die Autoklavierung. Insgesamt wurden für verschiedene Kombinationen aus den Parametern Rohmaterial, Transport-/Aufenthaltszeit und Umgebungstemperatur je 30 Messwerte erfasst. Aus diesen errechneten sich mittels quadratischer Regression bzw. Einsatz in die Formel für das Newtonsche Abkühlungsgesetz Parameter zum Einsatz in die Funktionen zur produktionszustandsabhängigen Bestimmung des Aufheiz- oder Abkühlverhaltens. Diese Funktionen und Parametersätze wurden in eine in Tecnomatix Plant Simulation® implementierte Materialflusssimulation des Werks eingesetzt und anhand von Simulationsszenarien mit den Fertigungsaufträgen und Temperaturmessungen der drei Produktionswochen validiert. Als Voraussetzung für eine Validierung der Energiesimulation ist eine ordentliche Validierung des zugrunde liegenden Materialflusssimulationsmodells durchzuführen, da andernfalls die ermittelten Temperaturwerte aufgrund des abweichenden Materialflussverhaltens zu stark gegenüber dem bei den Temperaturmessungen vorliegenden Materialfluss variieren.

## 5.2 Untersuchungsergebnisse

Zur Erreichung einer hohen Aussagekraft der Validierung wurden die erfassten Temperaturwerte aus der Simulation um Ausreißer gegenüber den Transport-/Aufenthaltszeiten bei der Messung der Temperaturen bereinigt. Eine Gegenüberstellung von Temperaturwerten aus der Simulation und aus den Messungen je Materialart dient der Bewertung der in diesem Beitrag aufgezeigten Modellierung. Die Ergebnisse weisen deren Eignung nach, da die maximale Abweichung über die gesamte Simulation im Mittel an der letzten Messstelle bei nur 0,98 °C (2,2 %) liegt. Zudem sind nahezu alle simulierten Werte innerhalb des Streubereichs der Messwerte. Die zugehörige Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten Werte ist in Abbildung 5 dargestellt.



**Abbildung 5:** Gegenüberstellung der gemessenen Temperaturwerte mit errechneten Werten aus dem Simulationslauf für eine Steinsorte



Wie die zu Abbildung 5 gehörige Tabelle 2 zeigt, liegen an den vorangehenden Messstellen sogar geringere Abweichungen vor. Dies wird unterstrichen durch die maximale Diskrepanz zwischen simulierten und gemessenen Werten von 3,79 °C.

**Tabelle 2:** Auswertung des Vergleichs von gemessenen und simulierten Werten

	Messstelle 2			Messstelle 3			Messstelle 4			Messstelle 5		
	Min	Ø	Max	Min	Ø	Max	Min	Ø	Max	Min	Ø	Max
simuliert [°C]	67,9	68,1	68,2	56,8	58,7	59,0	48,2	48,9	49,2	42,3	42,8	43,0
gemessen [°C]	65,8	67,9	70,5	57,0	58,5	60,6	47,3	48,9	50,3	42,2	43,7	44,6

Auffällig ist der kleinere Streubereich in der Simulation im Vergleich zu den Messwerten. Dies ist vorrangig durch das Mitteln der errechneten Abkühlungsraten aus den je 30 Messwertpaaren bedingt. Dieser Umstand kann behoben werden, indem die Verteilung der bestimmten Abkühlungsraten ermittelt und anhand dieser Funktion Zufallszahlen für  $\alpha_{M_i, M_{i+1}}$  in der Simulation generiert werden. Zudem können Messgerätschwankungen sowie inhomogene Temperaturverteilungen im Material zu Abweichungen führen. Ebenso können Ungenauigkeiten bei der Verfolgung von Schüttgut beispielsweise im Hinblick auf Transportzeiten auftreten.

## 6 Fazit und Ausblick

Der vorliegende Beitrag zeigt eine Methodik auf, wie auf Basis einer strukturierten Erfassung von Messwerten die Aufzeichnung von Temperaturverläufen von Bauteilen und Anlagen in einer Materialflusssimulation präzise modelliert werden kann. Die Eignung dieser Methodik wird anhand einer Fallstudie in einem realen KS-Werk validiert und ist ebenso auf andere Fertigungen übertragbar.

Die dadurch ermöglichte simulative Verfolgung von Bauteil- und Anlagentemperaturen stellt die Grundlage für Optimierungen in einzelnen Prozessschritten hinsichtlich des Einsatzes von thermischer Energie und Prozessgeschwindigkeiten dar. Gerade bei der Simulation der KS-Herstellung ist die präzise Ermittlung von Material- und Anlagentemperaturen Voraussetzung für eine genaue Abbildung des Autoklavierungsprozesses. Denn die dort anfallenden Härtezeiten sowie der Gesamtenergieeinsatz hängen stark von den Ausgangstemperaturen der beteiligten Komponenten ab.

## Danksagung

Die Autoren danken der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) für die Förderung des Forschungsprojekts mit der IGF-Nr. 20 EWN. Dieses Projekt wird unter Federführung der AiF durchgeführt und vom Bundesministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Energie (BMWi) im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) auf Grundlage eines Beschlusses des Deutschen Bundestages finanziert.

## Literatur

- 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 2015a.
- Donhauser, T.; Ehrhardt, J.; Rackow, T.; Franke, J.; Schuderer, P.: Simulation-based Optimization of the Energy Consumption in the Hardening Process for Calcium Silicate Masonry Units. In: Franke, J.; Kreitlein, S. (Hrsg.): Energy Efficiency in Strategy of Sustainable Production, Nürnberg, 2015b, S. 249–256.
- Donhauser, T.; Rackow, T.; Hirschbrunn, J.; Schuderer, P.; Franke, J.: Valid Methodology for Using Discrete Event Simulation to Improve the Resource Consumption for the Manufacturing of Masonry Units. *Procedia CIRP* 41 (2016), S. 57–62.
- Junge, M.: Simulationsgestützte Entwicklung und Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung. Kassel: Kassel Univ. Press 2007.
- Kohl, J.: Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexiblen Fabrik. Bamberg: Meisenbach 2016.
- Mayr, A.; Lechler, T.; Donhauser, T.; Metzner, M.; Schäffer, E.; Franke, J.: Advances in energy-related plant simulation by considering load and temperature curves in discrete event simulations. In: Butala, P.; Govekar, E.; Vrabic, R. (Hrsg.): *Procedia CIRP*, 2019,
- Müller, E.; Engelmann, J.; Löffler, T.; Strauch, J.: Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben. Berlin, Heidelberg: Springer 2009.
- Peter, T.; Reiche, L.; Wenzel, S.; Fehlbier, M.: Coupled Simulation of Energy and Material Flow - a Use Case in an Aluminium Foundry. In: Chan, Wai Kin et al. (Hrsg.): Winter Simulation Conference, Las Vegas, NV, 2017, S. 3792–3803.
- Roemer, A.C.; Steffen, S.: A review of literature on simulation-based optimization of the energy efficiency in production. In: Roeder, T.M.; Frazier, P.I.; Szechtman, R.; Zhou, E.; Fowler (Hrsg.): *Simulating complex service systems*, Crystal Gateway Marriott, Arlington, VA, 2016, S. 1416–1427.
- Schlüter, W.; Henninger, M.; Buswell, A.; Schmidt, J.: Schwachstellenanalyse und Prozessverbesserung in Nichteisen-Schmelz- und Druckgussbetrieben durch bidirektionale Kopplung eines Materialflussmodells mit einem Energiemodell. In: Wenzel, S.; Peter, T. (Hrsg.): *Simulation in Produktion und Logistik*, Kassel, 2017, S. 19–28.
- Seewaldt, M.; Bracht, U.: Energieorientierte Betrachtung von Engpässen in Fertigungssystemen mit der Materialflusssimulation. In: Wenzel, S.; Peter, T. (Hrsg.): *Simulation in Produktion und Logistik*, Kassel, 2017, S. 29–38.
- Solding, P.; Thollander, P.: Increased Energy Efficiency in a Swedish Iron Foundry Through Use of Discrete Event Simulation. In: *Proceedings of the 38th conference on Winter simulation*, Monterey, CA, USA, 2006, S. 1971–1976.
- Thiede, S.: *Energy efficiency in manufacturing systems*. Berlin: Springer 2012.
- Wenzel, S.; Peter, T.; Stoldt, J.; Schlegel, A.; Uhlig, T.; Josvai, J.: Considering Energy in the Simulation of Manufacturing Systems. In: 2018 Winter Simulation Conference (WSC), Gothenburg, Sweden, 2018, S. 3275–3286.
- Wolff, D.; Kulus, D.; Dreher, S.: Simulating Energy Consumption in Automotive Industries. In: Bangsow, S. (Hrsg.): *Use Cases of Discrete Event Simulation: Appliance and Research*. Berlin, Heidelberg: Springer 2012, S. 59–86.