

# **Entwicklung und Erprobung eines Vorgehens zur Validierung von Simulationsbausteinen komplexer Werkzeugmaschinen**

## ***Development and Testing of a Procedure for Validation of Simulation Building Blocks of Complex Machine Tools***

Greta Tjaden, Carina Mieth, TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH & Co. KG,  
Ditzingen (Germany), greta.tjaden@trumpf.com, carina.mieth@trumpf.com

**Abstract:** Verification and Validation are crucial for gaining sufficient confidence to transfer results from experiments within a simulation environment to real production systems. This paper shows the development and testing of a procedure for the validation of simulation building blocks, which represent machine tools for sheet manufacturing. This procedure has been developed based on a literature research for verification and validation methods considering surveys and applications. The developed validation procedure is applied on a simulation model consisting of several building blocks, and the approach and results are illustrated. Lastly, the limitations of the validation results are explained in detail.

## **1 Einleitung**

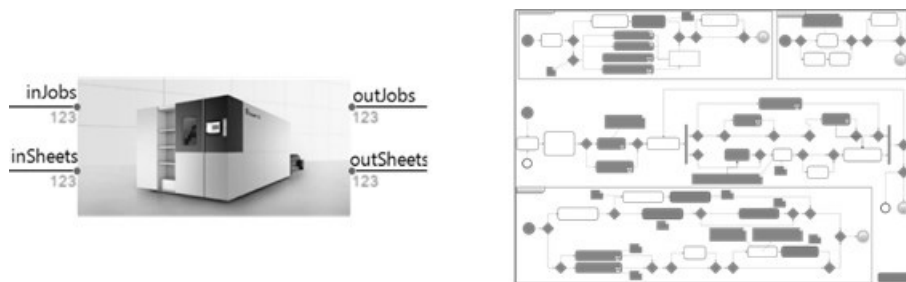
Die stetig steigenden Anforderungen an die Produktivität von Werkzeugmaschinen und Fabriken führen zu immer komplexeren Abläufen innerhalb der Maschine und bei deren Verkettung. Simulation als wichtiger Bestandteil der Digitalen Transformation kann helfen, diese Komplexität besser beherrschbar zu machen. Dazu werden Produktionsanlagen und Prozesse virtuell analysiert, sowie Produktionsoptimierungen ohne Unterbrechung der laufenden Produktion im Simulationsmodell vorab getestet (Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 2014, S. 4-6). Risiken und Fehler können so bereits in der Planung identifiziert werden. Voraussetzung hierfür ist die erfolgreiche Verifikation und Validierung (V&V) des Simulationsmodells.

### **1.1 Problemstellung**

Modellbibliotheken haben sich als geeignet erwiesen, um modulare wiederverwendbare Bausteine bereitzustellen, mit denen man schnell neue Simulationen bauen kann. Bevor die Bausteine zur Modellbibliothek hinzugefügt werden, durchlaufen sie einen Prozess zur Verifikation. In diesem wird die interne

Entscheidungslogik der Maschine mit qualitativen V&V-Methoden getestet. Um die Bausteine tatsächlich für aussagekräftige Simulation nutzen zu können, müssen sie jedoch auch validiert werden. Validierung wird als Bewertung der Genauigkeit des Modells durch den Vergleich des simulierten Verhaltens mit dem Verhalten des realen Systems beschrieben (Balci, 1998, S. 41; Moreno-Díaz, Pichler, & Quesada Arencibia, 2009, S. 53). Kurz gesagt wird die Genauigkeit des Simulationsmodells überprüft (Detering & Schnieder, 2011, S. 5). Da in der Literatur kein passendes Verfahren zur Validierung der vorliegenden Simulationsbausteine identifiziert werden konnte, muss ein generalistisches und adaptierbares Validierungsvorgehen entwickelt werden, welche die zuvor erfolgte qualitative Verifikation der Simulationsbausteine optimal ergänzt.

Für dieses Validierungsvorgehen wird ein datenbasierter Abgleich von Simulation und Realität angestrebt. Hierfür müssen Daten erhoben werden, die anschließend aufbereitet und analysiert werden müssen. Werden diese Daten dann in das Simulationsmodell eingespeist, kann das Verhalten des Modells, mit dem des realen Systems verglichen werden. Eine abstrakte Veranschaulichung der Beziehung zwischen Prozess- und Simulationsmodell ist in Abbildung 1 erkennbar. Im Simulationsmodell gibt es an der Oberfläche Ein- und Ausgänge für die Aufträge (Jobs) und Blechtafeln (Sheets). Der Materialfluss, der zwischen diesen Ein- und Ausgängen nachgestellt werden muss, ist daneben zu sehen. Dabei muss auch die Kompatibilität der Maschinen mit den Automatisierungseinheiten berücksichtigt werden.



**Abbildung 1:** Simulationsbaustein einer komplexen Werkzeugmaschine (linkes Bild) mit Informations- (inJobs/outJobs) und Materialfluss (inSheets/outSheets) und beispielhaft ein Prozessmodell als UML Aktivitätsdiagramms (rechtes Bild)

## 1.2 Wissenschaftliche Abgrenzung

Zuerst wurde eine Literaturrecherche zur Identifikation der wesentlichen Methoden zur V&V durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Literaturrecherche sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Veröffentlichungen sind in Übersicht und Anwendung kategorisiert sowie eine Einordnung in qualitative und quantitative Methoden wurde hinzugefügt. Die Veröffentlichungen unter *Übersicht* nennen vor allem V&V-Methoden und erklären diese. Die Veröffentlichungen unter *Anwendung* erwähnen deutlich weniger V&V-Methoden.

Tabelle 1: Ergebnisse der Literaturrecherche nach Methoden zur V&V

Verifikation & Validierung		qualitativ	Übersicht								Anwendung												
		quantitativ	Henderson et. al. 1970	Sargent 1984	Kleijnen et. al. 1996	Balci et. al. 1998	Rabe et. al. 2008	Rabe et. al. 2008b	Aboud et. al. 2009	Sargent 2011	Dozortsev et. al. 2002	Martens et. al. 2003	Ni et. al. 2004	Martens et. al. 2006	Rebba et. al. 2006	Moreno-Díaz et. al. 2009	Al-Weshashi et. al. 2013	Haffke et. al. 2015	Pei et. al. 2015	Olsen et. al. 2018	Jeon et. al. 2019	Cano-Moreno et. al. 2019	
Methode	Typ																						
Baysian Hypothesis Testing	X													X									
Cause-Effect-Graph	X				X	X								X									
Classical Hypothesis Testing	X		X	X					X					X									
Comparison to other Models	X	X	X		X	X	X												X				
Computenized Model Verification	X	X	X						X														
Conceptual Model Validation	X	X	X	X					X														
Data Validity	X		X	X		X	X		X														
Degenerate Test	X	X	X						X														
Determined Values	X	X	X	X		X	X	X															X
Dimensional Consistency Test	X	X				X	X							X									
Event Validity	X	X	X	X		X	X	X	X										X				X
Extreme Condition Test	X	X	X	X		X	X	X	X											X			X
Face Validity	X		X	X		X	X	X	X											X			
Historical Information Validation	X	X	X	X		X	X	X	X			X			X		X		X				X
Historical Methods	X	X	X	X					X	X													
Internal Validity	X		X	X		X	X	X	X														
Mathematical Approaches	X									X							X						
Metamorphic Testing	X																				X		
Multistage Validation	X	X	X	X					X	X													
Neural Network	X	X											X										
Operational Graphics	X		X	X		X	X	X	X			X											
Operational Validity	X	X	X						X														
Parameter Variability Sensitivity Analysis	X	X	X						X	X													
Predictive Validation	X	X	X		X	X	X	X	X														
Review / Desk-Checking / Self-Inspection	X					X	X	X															
Scoring Model	X								X														
Sensitivity Test	X					X	X	X						X				X	X				
Statistical Methods	X	X	X				X	X		X	X	X	X										
Structure d Walkthrough	X					X	X	X															
Submodel Testing	X				X	X	X																
Traces	X	X	X		X	X	X	X	X														
Turing Test	X	X	X		X	X	X	X	X														
Validation by a Third Party	X				X			X	X														

Diese werden jedoch an Beispielen aus unterschiedlichen Branchen angewandt. Ein Vorgehensmodell rein für die Validierung, nach Möglichkeit mit einem industriellen

Hintergrund, konnte in der Literatur nicht identifiziert werden. Auch bei TRUMPF gab es bisher noch kein Vorgehen für die Validierung von Simulationsmodellen.

Um in die Modellbibliothek aufgenommen zu werden, muss jeder Simulationsbaustein erfolgreich verifiziert werden. Bestandteil dieses Verifikationsprozesses sind nicht nur Methoden wie z. B. Operational Graphics oder Desk-Checking, sondern auch die Erfüllung der „Definition of Done“-Kriterien. Diese definieren beispielsweise Anforderungen an die Dokumentation. Erst wenn der Verifikationsprozess abgeschlossen ist, kann die Validierung erfolgen. Weil bei der Verifikation eher qualitative Methoden verwendet werden, wird in der Validierung auf quantitative Methoden gesetzt. Diese sind in Abbildung 2 hervorgehoben. Die entwickelte Methode nutzt Prozesssignale der Werkzeugmaschine zur Validierung von Simulationsbausteinen. Sie wird zwar am Anwendungsfall von TRUMPF erprobt, ist jedoch aufgrund der hohen Komplexität der einzelnen Simulationsbausteine generisch gehalten. So bietet sie aufgrund der daraus resultierenden allgemeinen Anwendungsmöglichkeiten auch Mehrwert für den wissenschaftlichen Kontext und ist übertragbar auf andere Werkzeugmaschinen. Besonders interessant wird dieser Ansatz auch bei fortschreitender Standardisierung von Maschinensignalen, z. B. über Standards wie umati (umati, 2018). Die Validierungsmethoden könnten dann kontinuierlicher und automatischer ausgeführt werden und benötigen keine aufwendigen Anpassungen an herstellerspezifische Datenmodelle.

### 1.3 Vorgehen und Aufbau des Beitrags

Das Vorgehen des Beitrags ist in Abbildung 2 visualisiert. Zuerst werden Methoden zur V&V in der Literatur identifiziert. Dabei werden sowohl Übersichten über Methoden als auch Anwendungen berücksichtigt. Anschließend wird aus diesen Methoden das Validierungsvorgehen entwickelt, wobei der Fokus auf den quantitativen Methoden liegt. Das Validierungsvorgehen wird mit Simulationsexpert\*innen und in der Literatur identifizierten Qualitätskriterien für eine gute Validierungsmethode evaluiert. Nachdem das Verfahren auf ein erstes Simulationsmodell angewendet worden ist, werden die Einschränkungen der Ergebnisse erläutert.

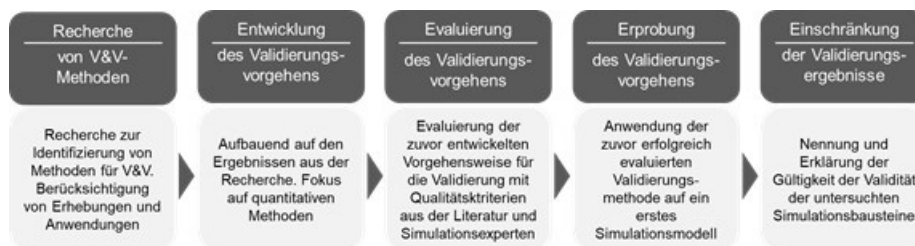


Abbildung 2: Vorgehen des Beitrags (V&V: Verifikation und Validierung)

## 2 Entwicklung der Validierungsmethode

Nach der zuvor beschriebenen Literaturrecherche wurde eine Auswahl der recherchierten Methoden getroffen. Da die zuvor erfolgte Verifikation der

Simulationsbausteine eher qualitativer Natur ist, wurde der Fokus vor allem auf quantitative Methoden gelegt. Zudem wurden Methoden berücksichtigt, die die Sensitivität von Parametern berücksichtigen. Die so entwickelte Methode wurde von Simulations-Expert\*innen und in der Literatur identifizierten Qualitätskriterien für Validierungsmethoden evaluiert. Die identifizierten Kriterien sowie eine Beurteilung deren Erfüllung von der Validierungsmethode ist in Tabelle 2 dargestellt. Die Validierungsmethode soll sicherstellen, dass die stochastische Natur des Prozesses berücksichtigt wird, das Vorgehen sowie die Ergebnisse nachvollziehbar dokumentiert werden, eine kontinuierliche V&V erfolgt, und der betrachtete Simulationsbaustein valide ist. Letzteres bedeutet, dass alle relevanten Aspekte des Bausteins untersucht werden müssen. Außerdem muss die Validierungsmethode durchführbar sein und sollte unabhängig von den Erstellenden der Simulationsbausteine sein, um eine hohe Qualität der Ergebnisse zu gewährleisten.

**Tabelle 2:** Qualitätskriterien für Validierungsmethoden nach (Rabe et. al. 2008)

Kriterium	Grad der Erfüllung	
Stochastik	Voll	Die Stochastik wird in der Datenerfassung und -analyse berücksichtigt. Die Sicherstellung der Berücksichtigung von Stochastik in den Simulationsergebnissen liegt in der Verantwortung der Validierenden.
Dokumentation	Voll	Ein Beispiel für die Dokumentation wurde mittels GitExtension und Azure angelegt.
Kontinuität	Teilweise	V&V wird in allen Phasen der Bausteinerstellung durchgeführt, aber es wurde keine Methode etabliert, die eine kontinuierliche und automatische Validierung über die komplette Nutzungsdauer des Bausteins sicherstellt.
Validität	Voll	Eine Reihe von Validierungsmethoden ist enthalten, und die Berücksichtigung aller relevanten Aspekte wird bei der Validierung abgefragt.
Durchführbarkeit	Voll	Die Validierungsmethode wurde beispielhaft umgesetzt, wodurch die Durchführbarkeit bewiesen wurde.
Unabhängigkeit der Prüfenden	Voll	Die Prüfenden erstellen keine Simulationsbausteine. Somit ist die Unabhängigkeit gegeben.

In Abbildung 3 ist das entwickelte mehrstufige Validierungsvorgehen abgebildet. Zuerst werden Prozess- und Simulationsmodell verglichen, um die relevanten Prozesszeiten zu identifizieren. Anschließend wird eine Datenerhebung an der Maschine durchgeführt, um die Datengrundlage für die Validierung zu erhalten. In dieser Datenerhebung müssen ausreichend viele Werte für die Parameter erhoben werden, um mögliche statistische Abweichungen innerhalb des Produktionsprozesses abzubilden. Um die Datengrundlage für die jeweiligen Parameter zu erhöhen, werden die Werte aus unterschiedlichen Experimenten zusammengefasst, die als unabhängig voneinander betrachtet werden.

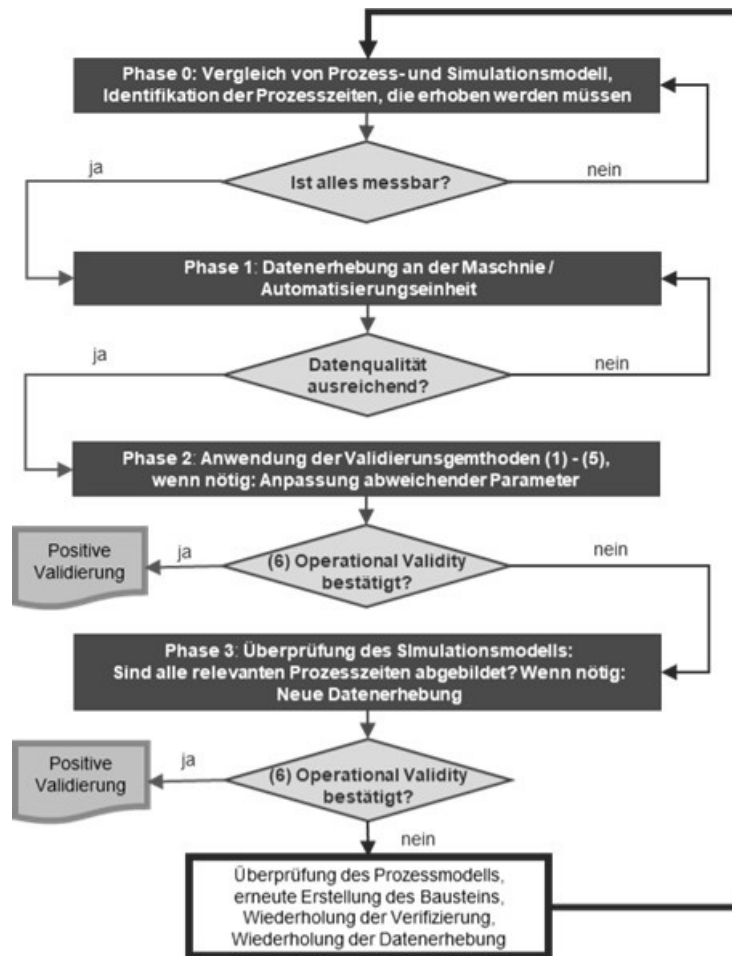


Abbildung 3: Das entwickelte Validierungsvorgehen.

(1) **Event Validity:** Ereignisse im Simulationsmodell werden mit denen der Realität verglichen. (2) **Historical Information Validation:** Vergleich mit historischen Daten, falls vorhanden. (3) **Predictive Validation:** Vorhersage des Systemverhaltens mit dem Simulationsmodell und anschließender Vergleich des realen Systemverhaltens mit der gemachten Vorhersage. (4) **Parameter Variability Sensitivity Analysis:** Änderung der Werte der Eingangs- und internen Parameter eines Modells, um die Auswirkungen auf das Verhalten oder die Ausgabe des Modells zu bestimmen. Im Modell sollten die gleichen Beziehungen auftreten wie im realen System (5) **Sensitivity Test:** Auswertung des Einflusses der Eingangsparameter auf die Ausgangsparameter mit besonderem Augenmerk auf die sogenannten sensiblen Parameter, bei denen schon kleine Änderungen große Auswirkungen auf die Ausgangsparameter haben. (6) **Operational Validity: (3 %)** Bestimmung, ob das Ausgangsverhalten des Simulationsmodells die für den beabsichtigten Zweck des Modells erforderliche Genauigkeit über den Bereich der

beabsichtigten Anwendbarkeit des Modells aufweist

Wenn die Qualität dieser Daten für die Validierung ausreicht, werden in Phase 2 die Validierungsmethoden durchgeführt. Für das entwickelte Validierungsvorgehen wurden die Methoden Event Validity, Historical Information Validation, Predictive Validation, Parameter Variability Sensitivity Analysis und Sensitivity Test ausgewählt, da diese Methoden datenbasiert sind und auch die Sensitivität der Parameter untersuchen. Die konkrete Auswahl aus diesen Methoden für das jeweilige Validierungsvorhaben ist abhängig von der zur Verfügung stehenden Datengrundlage und der Notwendigkeit weiterführender Untersuchungen der einzelnen Prozesszeiten. So sollen unterschiedliche Szenarien und falls nötig, mögliche Untersuchungen der Parameter berücksichtigt werden.

Eine interne Umfrage wurde zur vorläufigen Bestimmung der geforderten Genauigkeit für die unterschiedlichen Anwendungsmöglichkeiten des Fabriksimulationstools durchgeführt. Mittels Validierung soll nun bestimmt werden, ob die geforderte Genauigkeit erreicht wird. Dabei wird angestrebt, dass jeder Baustein für jeden Use Case eingesetzt werden kann und daher auch die höchste geforderte Genauigkeit von 3 % Abweichung zwischen Simulationsmodell und Realität bezogen auf die Zykluszeit und der Summe der Abweichungen der einzelnen Prozesse erreicht.

### **3 Anwendung der Validierungsmethode**

Die Datenerhebung soll an zwei identischen Maschinen durchgeführt werden, um die Reproduzierbarkeit zu gewährleisten und systematische Fehler auszuschließen. Stimmen die erhobenen Daten von beiden Automatisierungseinheiten überein, so ist davon auszugehen, dass die erhobenen Daten von einer Automatisierungseinheit auf die andere übertragen werden können.

Um erste Aussagen über die Parametrierbarkeit der Bausteine treffen zu können, soll zudem das gleiche Experiment an Automatisierungseinheiten mit unterschiedlicher Maschinenkonfiguration durchgeführt werden. Dies bedeutet, dass die gleichen Automatisierungseinheiten mit einer größeren Maschine kombiniert werden können.

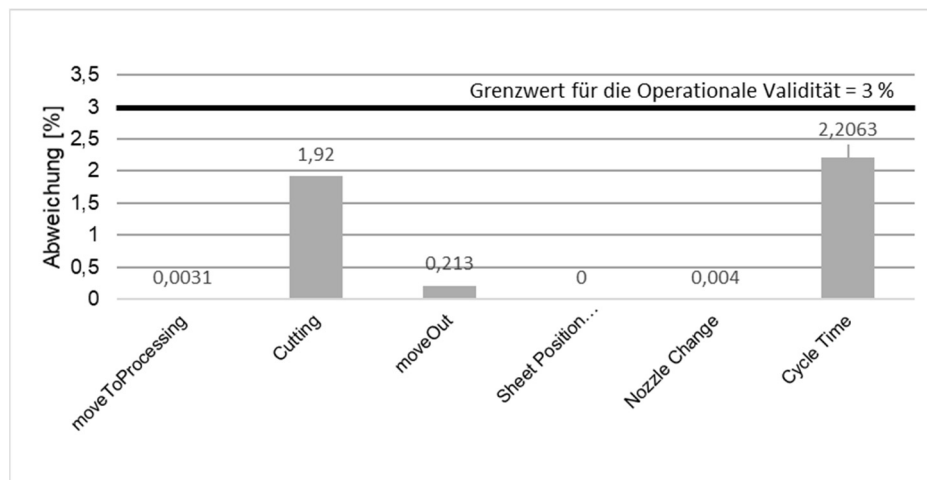
Nach der Durchführung der ausgewählten Validierungsmethoden wird die Operationale Validität berechnet, also die Genauigkeit des Simulationsmodells im Hinblick auf das reale System. Liegt diese im zuvor für die Simulationsbausteine definierten Rahmen, liegt ein erfolgreiches Validierungsergebnis vor. Überschreitet die berechnete Operationale Validität den definierten Grenzwert, wird Phase 3 des Validierungsvorgehens durchgeführt. Hier wird für das Simulationsmodell überprüft, ob alle relevanten Prozesszeiten abgebildet sind. Wenn nötig, wird eine erneute Datenerhebung durchgeführt. Anschließend wird die Validierung analog zu Phase 2 durchgeführt und die Operationale Validität erneut berechnet. Kann der Grenzwert nun eingehalten werden, wird die Validierung als erfolgreich betrachtet. Wird der Grenzwert trotz der Anpassungen weiterhin überschritten, so muss das Prozessmodell überprüft, der Simulationsbaustein neu entwickelt, die Verifikation und ggf. auch die Datenerhebung wiederholt werden.

Das Experiment für die Erhebung der Validierungsdaten wird an einer 2D-Laserschneidmaschine durchgeführt, die mit zwei Automatisierungskomponenten

zum Be- und Entladen zusammengeschlossen ist. In vorherigen Experimenten haben sich folgende Einstellungen bewährt:

- Schneiden mit geringer Laserleistung: Bei sehr geringer Laserleistung wird der Schneidprozess realitätsnah durchgeführt, ohne dass das Blech tatsächlich geschnitten wird. Dieses Vorgehen spart Material und ist damit nachhaltig und günstig.
- Tafelbelegung mit möglichst geringer Schneidzeit: Der zeitliche Aufwand der Experimente wird gering gehalten. Zudem lassen sich so einfacher die Wartezeiten der Automatisierungskomponenten ermitteln.
- Kleine und leichte Tafeln: Es werden Bleche genutzt, die eine Person manuell transportieren kann, um auch hier den Aufwand so gering wie möglich zu halten.
- Die maximal verfügbare Anzahl gleicher Bleche für die Experimente verwenden, die obige Anforderungen erfüllen (in diesem Fall 11 Bleche).
- Wiederholung der Experimente mit und ohne Nebenzeiten, wie z. B. der Blechlagenvermessung oder Düsenwechsel.

Um die Zeiten so genau wie möglich und ohne menschlichen Einfluss zu erheben, werden Messpunkte in das NC-Programm gesetzt und zusätzlich die verfügbaren Signale aus der Maschinensteuerung aufgezeichnet. Anhand dieser aufgezeichneten Daten werden die Parameter für die Validierung berechnet, z. B. die Schneidzeit, die Zeit für den Düsenwechsel oder die Blechlagenvermessung. Diese Zeiten dienen als Eingangsparameter für das Simulationsmodell, in dem das Experiment für die Datenerhebung nachgestellt wird. Anschließend werden die Zeiten des Simulationsmodells und des realen Systems miteinander verglichen (s. Abb. 4).



**Abbildung 4:** Vergleich der ermittelten Abweichungen für die Validierungsparameter zwischen Simulationsmodell und realem System (TruLaser 1030 fiber)

Es ist auf den ersten Blick erkennbar, dass keiner der Validierungsparameter den Grenzwert für die Operationale Validität von 3 % überschreitet. Der Simulationsbaustein kann dennoch nicht als positiv validiert eingestuft werden, weil



die Datengrundlage mit teilweise zwei ermittelten Werten noch zu klein ist, um statistische Sicherheit zu geben. Die Simulationsbausteine der Automatisierungskomponenten können nicht validiert werden, weil die Signale für die Datenerhebungen nicht zur Verfügung standen.

#### **4 Einschränkungen der Ergebnisse**

Es wurde gezeigt, dass ein Vorgehen zur Validierung der Simulationsbausteine entwickelt und erfolgreich angewendet werden konnte. Es gibt jedoch Fragen, die in diesen Zusammenhang noch nicht geklärt wurden.

Es wurde bisher nicht untersucht, ob die Simulationsbausteine nach der Validierung in allen Kombinationen anwendbar sind, oder ob jede Kombination aus Automatisierungskomponente und Maschine einzeln validiert werden muss. Daher können keine Aussagen über das Verhalten in anderen Kombinationen gemacht werden. Zudem ist die Parametrisierung der einzelnen Bausteine noch nicht abschließend geklärt. Fest steht, dass die Simulationsbausteine parametrierbar sind, dass also ein Simulationsbaustein unterschiedliche Größen eines Maschinentyps abbilden kann. Die Parametrisierung der einzelnen Größen muss jedoch noch erfolgen.

Um die Reproduzierbarkeit des Validierungsvorgehens zu gewährleisten, muss die Messung noch an einer identischen Kombination von Automatisierungskomponente und Maschine wiederholt werden. Aufgrund eines Softwarefehlers, der eingespielt wurde, um einen Kunden-Fehlerfall zu reproduzieren, danach jedoch nicht sofort entfernt wurde, ist die damals durchgeführte Messung an einer identischen Maschinenkombination nicht verwendbar gewesen. Dass der Softwarefehler jedoch durch die Validierung entdeckt wurde, zeigt, dass nicht nur Simulationsmodelle, sondern auch Maschinen mit der Methode validiert werden können.

Zur Ermittlung des Grenzwerts der Operationalen Validität der Simulationsmodelle wurde eine interne, vorläufige Umfrage durchgeführt, die jedoch nicht repräsentativ für den Maschinenbau ist. Außerdem muss verifiziert bzw. falsifiziert werden, ob die geforderte Genauigkeit der Simulationsmodelle für die Bausteine übernommen werden kann, oder ob die Bausteine selbst eine andere Genauigkeit erreichen müssen, damit die aus ihnen erstellten Simulationsmodelle den festgelegten Grenzwert der Operationalen Validität nicht überschreiten.

Einige Validierungsparameter wie z. B. die Blechlagenmessung sind abhängig von der Blechgröße. Dieser Einfluss ist noch nicht untersucht worden und muss zu einem späteren Zeitpunkt nachgeholt werden. Die Analyse der verschiedenen Maschinengrößen ist noch nicht abgeschlossen, da nur zwei Maschinengrößen analysiert wurden.

Schließlich konnten im Rahmen dieser Arbeit aufgrund der Tafelverfügbarkeit nicht mindestens 30 Durchläufe (Meran et. al., 2013, S. 94) pro Experiment durchgeführt werden. Um die Datenbasis so weit wie möglich zu erweitern, wurden die Daten für die Parameter, die bei den einzelnen Versuchen ermittelt wurden, zusammengefasst. Dennoch ist nicht gewährleistet, dass die stochastische Natur der Produktionsprozesse hinreichend erfasst worden ist.

## 5 Fazit

Es wurde eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt, um Methoden für die V&V von Simulationsmodellen und -bausteinen zu identifizieren. Dabei wurden sowohl Erhebungen als auch Anwendungen dieser Methoden berücksichtigt. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurde ein iteratives Vorgehen zur Validierung der Simulationsbausteine entwickelt. Dieses Vorgehen ist vorwiegend quantitativer Natur und berücksichtigt Validierungsmethoden unterschiedlicher Zeithorizonte sowie die Evaluierung von Parametern. Dabei werden sowohl der Abgleich von Prozess- und Simulationsmodell sowie die Planung, Durchführung und Auswertung der Datenerhebung berücksichtigt, bevor die eigentliche Validierung beginnt. Um eine hohe Qualität der Validierungsergebnisse zu gewährleisten, wurde die Methode von Simulationsexpert\*innen und nach in der Literatur identifizierten Qualitätskriterien für V&V evaluiert. Die Durchführbarkeit der Validierungsmethode wurde an einem Beispiel demonstriert. Voraussetzung für das entwickelte Validierungsvorgehen ist die Verfügbarkeit von Daten. Die Bausteine, aus denen das Simulationsmodell besteht, konnten validiert werden.

In zukünftigen Arbeiten wird die Übertragbarkeit der Bausteine in andere Simulationsmodelle, also in anderen Kombinationen von Maschinen und Automatisierungskomponenten, überprüft. Sobald die entsprechenden Signale zu jeder Zeit im Feld verfügbar sind, soll die Validierung automatisch erfolgen. Dies würde die Verfügbarkeit der Daten erhöhen und die Kontinuität der Validierungsmethode verbessern. Zukünftig soll mithilfe von repräsentativen Produktionsdaten die Validierung von Simulationsmodellen vereinheitlicht werden. Diese Referenzdatensätze enthalten Produktionsdaten, -schritte, Auftragsstrukturen und weitere Kundenmerkmale.

## Literatur

- Aboud, S. J., Al Fayoumi, M., & Alnuaimi, M. (2009). Verification and Validation of Simulation Models, 58–74.
- Al-Weshashi, M. A., Anderson, A., Tian, G., & Makhdoum, B. M. A. (2013). Validation of Simulation Model for Cogeneration Power and Water Desalination Plant. *International Journal of Modeling and Optimization*.
- Balci, O. (1998). Verification, Validation, and Accreditation.
- Cano-Moreno, J. D., & Cabanellas, J. M. (2019). Experimental Validation of an Escalator Simulation Model. *Latin American applied research Pesquita aplicada latino americana = Investigación aplicada latinoamericana*.
- Detering, S., & Schnieder, L. (2011). Calibration and Validation of Simulation Models for Investigation of Traffic Assistance Systems, 217–225.
- Dozortsev, V. M., Kneller, D. V., & Levit, M. J. (2002). On the Validity of Simulation Models in Process Engineering and Operator Training.
- Haffke, B., Möller, R., Melz, T., & Strackeljan, J. (2015). Validation of Simulation Models without Knowledge of Parameters Using Differential Algebra. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 1–9.
- Henderson, S. G., Biller, B., Hsieh, M.-H., Shortle, J., Tew, J. D., & Barton, R. R. (1970). Landmark Paper Reprise - A tutorial on verification and validation of simulation models, 33–39.

- Jeon, H.-H., Jung, Y.-J., Siddique, M. A. A., Nam, K.-C., Kim, T.-B., Choi, C.-H., & Kim, Y.-J. (2019). Development and Validation of simulation model for three point-hitch during agricultural operation.
- Kleijnen, J. P.C., Bettonvil, B. W.M., & van Groenendaal, W. J. H. (1996). Validation of Simulation Models: Regression Analysis Revisited. SSRN Electronic Journal.
- Martens, J., Put, F., & Kerre, E. E. (2003). A fuzzy set and resemblance relation approach to the validation of simulation models.
- Meran, R., John, A., Roenpage, O., Staudter, C., & Lunau, S. (Eds.) (2013). Six Sigma+Lean Toolset: Mindset for Successful Implementation of Improvement Projects. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Moreno-Díaz, R., Pichler, F., & Quesada Arencibia, A. (2009). Computer Aided Systems Theory -- EUROCAST 2009: 12th International Conference, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, February 15-20, 2009 revised selected papers, 5717.
- Ni, D., Leonard, J. D., Guin, A., & Williams, B. M. (2004). Systematic Approach for Validating Traffic Simulation Models. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.* (1876), 20–31.
- Olsen, M., & Raunak, M. (2018). Increasing Validity of Simulation Models Through Metamorphic Testing. *IEEE Transactions on Reliability*, 68(1), 91–108.
- Pei, Y., Page, J., & Pearce, G. (2015). Validating Airframe Simulation Model of R22 Helicopter by Using Crashworthiness Standards.
- Rabe, M., Spieckermann, S., & Wenzel, S. (2008). A new procedure model for verification and validation in production and logistics simulation, 1717–1726. Retrieved September 11, 2020.
- Rabe, M., Spieckermann, S., & Wenzel, S. (2008). *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Rebba, R., Huang, S., Liu, Y., & Mahadevan, S. (2006). Statistical validation of simulation models. *International Journal of Materials and Product Technology*, 25(1/2/3), 164.
- Sargent, R. G. (1984). A tutorial on verification and validation of simulation models, 77–87.
- Sargent, R. G. (2011). Verification and validation of simulation models, 166–183.
- umati (2018). connecting the world of machinery. [https://umati.org/wp-content/uploads/umati\\_Folder\\_HM21.pdf](https://umati.org/wp-content/uploads/umati_Folder_HM21.pdf), letzter Zugriff 05.07.2021.
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (2014). *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen Grundlagen*. (Nr. 3633).