

Nachfolgend finden Sie die Übersetzung ins Deutsche des frei verfügbaren Fachartikels:

Original:

„Objective validation for short-term material flow simulation“.

Heiner Reinhardt*,^a, Boran Bogdanow^a, Roman Arnold^b, Bastian Prell^c,
Philipp Klimant^{a,d}, Frank Seifert^e, Mahtab Mahdaviasl^a, Steffen Ihlenfeldt^{a,f}.

Verfügbar unter (Stand 23.6.2025):

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827125005384>

Dies ist eine nicht offizielle deutsche Übersetzung des Originals durch:

Markus Bans

ATS Prozessoptimierung Markus Bans

Web: <https://simio-simulation.de>

Lizenz:

Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

S. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

Tagungsband der 58. CIRP Conference on Manufacturing Systems 2025: Objektive Validierung für die kurzfristige Materialflusssimulation

Heiner Reinhardt^{a,*}, Boran Bogdanowa, Roman Arnold^b, Bastian Prell^c,
Philipp Klimant^{a,d}, Frank Seiferte, Mahtab Mahdaviasl^a, Steffen Ihlenfeldt^{a,f}

^aFraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Reichenhainer Straße 88, 09126 Chemnitz, Deutschland

^bVolkswagen Sachsen GmbH, Kauffahrtei 47, 09120 Chemnitz, Deutschland ^cTechnische Hochschule Wildau, Hochschulring 1, 15745 Wildau, Deutschland

^dProfessur Virtuelle Technologien, Hochschule Mittweida - University of Applied Sciences, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida, Deutschland ^eTechnische

Universität Chemnitz, Straße der Nationen 62, 09111 Chemnitz, Deutschland

^fInstitut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik, Technische Universität Dresden, Helmholtzstraße 7a, 01062 Dresden

* Korrespondierender Autor. Tel.: +49 371 5397-1570. E-Mail-Adresse: heiner.reinhardt@iwu.fraunhofer.de

Abstrakt

Die Materialflusssimulation mittels Discrete Event Simulation (DES) wird in verschiedenen Branchen zur Unterstützung der Produktionsplanung und -steuerung eingesetzt. Dies liegt daran, dass Änderungen an Fertigungssystemen und Produktionsstrategien vor der tatsächlichen Umsetzung virtuell untersucht werden können. Da die manuelle Entwicklung und wiederholte Anpassung von Simulationsmodellen zeitaufwändig und fehleranfällig ist, sprechen zahlreiche Studien für eine computergestützte Modellerstellung und -synchronisation. Die Validierung solcher generierten oder synchronisierten Modelle wird jedoch selten in Betracht gezogen. Hier stellen wir eine erweiterbare objektive Validierungstechnik für die wiederholte Kurzzeitsimulation eines generierten Modells vor. Um dies zu veranschaulichen, wird die Technik auf eine großvolumige Automobilproduktionslinie und eine Reihe von Simulationszyklen angewendet.

© 2025 Die Autoren. Herausgegeben von Elsevier B.V.

Dies ist ein Open-Access-Artikel unter der CC BY-Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Peer-Review unter der Verantwortung des wissenschaftlichen Komitees des Internationalen Programmkomitees der 58. CIRP Conference on Manufacturing Systems

Schlüsselwörter: Digitaler Zwilling; Simulation; Qualität; Optimierung; Fertigungssystem; Steuerung; Analyse

1. Einleitung

Die Materialflusssimulation mittels Discrete Event Simulation (DES) kann die Produktionsplanung und -steuerung unterstützen [1, 2]. Die Abbildung des Ist-Zustands eines Fertigungssystems in einem Simulationsmodell ist jedoch herausfordernd, da manuelle Modellentwicklung oder wiederholte Anpassungen zeitaufwändig und fehleranfällig sind. Um diese Herausforderungen zu bewältigen, wurden Methoden zur computergestützten Modellgenerierung und -synchronisation eingeführt [3–5]. Darüber hinaus werden Techniken zur Datenanalyse zur Bestimmung von Fertigungssystemeigenschaften diskutiert [5–12].

Im Zusammenhang mit der Modellgenerierung und -synchronisation wird die Validierung mehrerer Simulationszyklen selten diskutiert. Daher schlagen wir eine Validierungstechnik für die mehrzyklische, kurzfristige Materialflusssimulation vor. Unsere Ausarbeitung wird anhand

eines Anwendungsfalls einer Großserien-Automobilproduktionslinie veranschaulicht.

Im Folgenden werden verwandte Arbeiten besprochen. Anschließend wird der Anwendungsfall vorgestellt, der als Beispiel für die Beschreibung unserer Methodik dient. Schließlich wird eine Schlussfolgerung gezogen.

2. Verwandte Arbeiten

Die Bestimmung der Genauigkeit einer Simulation kann sowohl die Modellverifizierung als auch die Modellvalidierung umfassen. Modellverifikation wird als "Nachweis, dass ein computergestütztes Modell ein konzeptionelles Modell innerhalb bestimmter Genauigkeitsgrenzen darstellt" [13] angesehen, während Modellvalidierung definiert wird als "Nachweis, dass ein computergestütztes Modell innerhalb seines Anwendbarkeitsbereichs einen zufriedenstellenden

Genauigkeitsbereich besitzt, der mit der beabsichtigten Anwendung des Modells vereinbar ist" [13].

Die Modellvalidierung kann sich auf die konzeptionelle Modellvalidität oder die operationale Validität konzentrieren. Während sich die konzeptionelle Modellvalidierung ausschließlich auf die Darstellung eines Systems konzentriert, untersucht die operationale Validierung den Output, der durch die Simulation des ausgedrückten Modells generiert wird [14].

den meisten Fällen ein oder nur wenige Simulationszyklen untersucht.

In dieser Arbeit wird eine objektive Validierungstechnik für die kurzfristige Materialflusssimulation mit mehreren Zyklen unter Berücksichtigung der Validität des konzeptionellen Modells sowie der betrieblichen Validität vorgestellt.

3. Anwendungsfall

2212-8271 © 2025 Die Autoren. Herausgegeben von Elsevier Dies ist ein Open-Access-Artikel unter der CC BY-Lizenz B.V.

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Peer-Review unter der Verantwortung des wissenschaftlichen Komitees des

Internationalen Programmkomitees der 58. CIRP Conference on Manufacturing Systems 10.1016/j.procir.2025.02.170

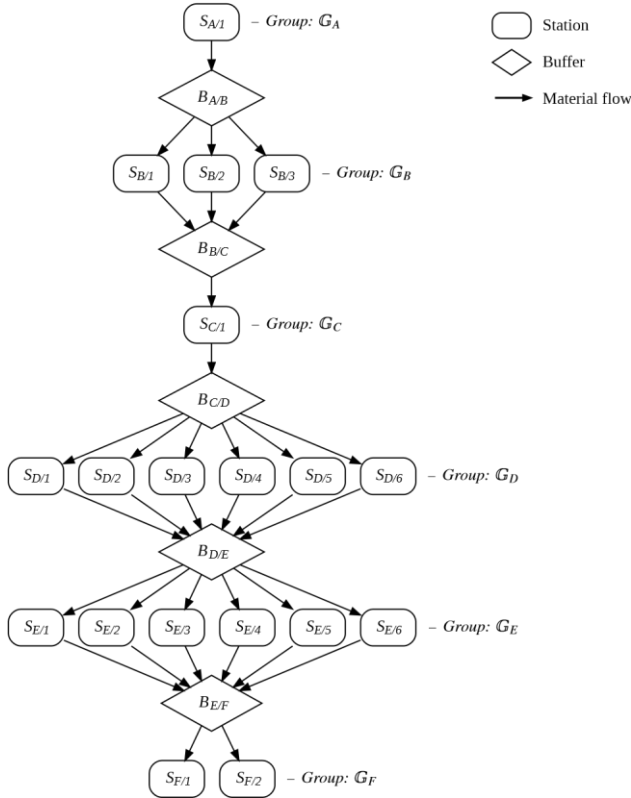


Abb. 1: Großserien-Produktionslinie in der Automobilindustrie in Anlehnung an [8, 21].

Darüber hinaus können wir zwischen subjektiven und objektiven Validierungstechniken unterscheiden. Während subjektive Techniken auf menschlicher Interpretation beruhen, berücksichtigen objektive Techniken einen definierten mathematischen Formalismus (vgl. [14, 15]).

Im Rahmen der Materialflusssimulation beruhen objektive Validierungstechniken auf einer datengetriebenen Ähnlichkeitsmessung zwischen dem Betrieb eines Produktionssystems und einer entsprechenden Simulation. So werden in [3] die Produktionsrate oder die Gesamtanlageneffektivität betrachtet, während in [7, 16–18] die Gesamtleistung der Anlage untersucht wird. Die Korrelationsanalyse in [5, 19, 20] basiert auf der Erfassung der Abfahrtszeit von Werkstücken, während die Bearbeitungszeit in [18] berücksichtigt wird.

Die vorgeschlagenen Techniken konzentrieren sich jedoch auf die operative Validierung und vernachlässigen die konzeptionelle Modellvalidierung. Darüber hinaus werden in

Unseren Beitrag dazu stützen wir auf eine großvolumige Automobilproduktionslinie (Abb. 1), die bereits in [8, 21] vorgestellt wird.

In dieser Fertigungsline wird jedes Werkstück, unabhängig von seiner Art, innerhalb des angegebenen Materialflusses sukzessive durch verschiedene Stufen zu einer definierten Taktzeit veredelt. Innerhalb jeder Stufe wird eine Fertigungsaufgabe von einer oder mehreren Stationen ausgeführt, die entsprechend gruppiert sind. Darüber hinaus ermöglichen Puffer eine Entkopplung des Materialflusses zwischen den Stufen. Daher ist der Stoffstrom teilweise divergent und teilweise konvergent (vgl. [22]). In einigen Arbeitsschritten kann eine Station bis zu zwei Werkstücke gleichzeitig bearbeiten.

Jede Gruppe ist alphabetisch indiziert (GA ... GF). Daher kann auf jede Station durch einen numerischen Index innerhalb der zugehörigen Gruppe verwiesen werden (z. B. SB/1 ... SB/3) und ein beliebiger Puffer kann sowohl durch seine vorhergehende Gruppe als auch durch seine nachfolgende Gruppe (z.B. BB/1) bestimmt werden. Basierend auf dieser Terminologie definieren wir die Menge G (Gl. 1) Zur Berücksichtigung aller Gruppen der Produktionslinie, wobei jede Gruppe als eine Reihe von Stationen dargestellt wird. Zusätzlich definieren wir die Menge B (Gl. 2) das aus jedem Puffer innerhalb der Produktionslinie besteht.

$$G = \{G_{in}, GB, G_C, G_D, G_E, G_F\} \tag{1}$$

$$G_A = \{S_{A/1}\}$$

$$G_B = \{S_{B/1}, S_{B/2}, S_{B/3}\} G_C =$$

$$\{S_{C/1}\}$$

$$G_D = \{S_{D/1}, S_{D/2}, S_{D/3}, S_{D/4}, S_{D/5}, S_{D/6}\} G_E =$$

$$\{S_{E/1}, S_{E/2}, S_{E/3}, S_{E/4}, S_{E/5}, S_{E/6}\} G_F = \{S_{F/1}, S_{F/2}\}$$

$$f/2\}$$

$$B = \{B_{A/B}, B_{B/C}, B_{C/D}, B_{D/E}, B_{E/F}\} \tag{2}$$

4. Methodik

Im Rahmen unserer laufenden Forschung erforschen wir die Möglichkeiten der computergestützten Modellgenerierung. Aus diesem Grund haben wir einen Algorithmus entwickelt, um ein Simulationsmodell eines Fertigungssystems in seinem aktuellen Zustand zu generieren. Hier beschreiben wir eine objektive Validierungstechnik zur Evaluierung des Modellgenerierungsalgorithmus zusammen mit einer geeigneten Simulations-Engine. Der Kontext der Anwendbarkeit des Simulationsmodells, wie er normalerweise für die Modellvalidierung erforderlich ist, ist jedoch nicht definiert.

Dabei evaluieren wir einen einzelnen Simulationszyklus (1-fache Validierung), um den Grundstein für die Bewertung vieler Simulationszyklen zu legen (k-fache Validierung). In beiden Fällen werden sowohl die konzeptionelle Modellvalidierung als auch die operative Validierung diskutiert und anhand des vorgestellten Use Case veranschaulicht.

4.1. Validierung (1-fach)

Zunächst gehen wir davon aus, dass der aktuelle Zustand einer Produktionslinie (System *s*) durch das Simulationsmodell (System *s*) ausreichend abgebildet wird. Um dies zu verdeutlichen, bezieht sich *s* auf die Produktionslinie des vorgestellten Automotive-Anwendungsfalls, während *s* sich auf ein entsprechend generiertes Simulationsmodell zu einem bestimmten Zeitpunkt bezieht.

Im Folgenden diskutieren wir die konzeptionelle Modellvalidierung und die operationale Validierung durch den Vergleich von *s* mit *s*. Dort-
528

Umfang	Eigentum	Symbol	Einheit	Beschreibung
Gruppe	Bearbeitungsdauer	<i>t</i>	<i>s</i>	Zeitaufwand für die Werkstückbearbeitung durch eine beliebige Station einer Gruppe
Puffer	Fassungsvermögen	<i>c</i>	–	Maximale Belastung der Werkstücke

Tabelle 1: Eigenschaften für die Validierung des konzeptionellen Modells.

Dabei wird die Abweichung von Eigenschaften zwischen beiden Systemen diskutiert, z.B. Pufferkapazitäten oder die erzeugte Leistung von Werkstücken.

Für die folgende Untersuchung gehen wir davon aus, dass das operationelle Fertigungssystem *s* und das entsprechend generierte Simulationsmodell *s* strukturell identisch sind. Somit ist jede Fertigungsressource (z.B. Station, Puffer) sowie jeder Weg für den Werkstücktransport von System *s* in System *s* vorhanden und umgekehrt.

Zusätzlich übernehmen wir die eingeführte Namenskonvention für die Referenzierung der Eigenschaften innerhalb der jeweiligen Systeme *s* und *s*. Folglich bezieht sich der Ausdruck *px* auf den Wert der Eigenschaft *p* einer Fertigungsressource *x* in *s*, während *px* sich auf den jeweiligen Eigenschaftswert derselben Fertigungsressource *x* in *s* bezieht.

Unter Berücksichtigung der angenommenen strukturellen Identität beider Systeme und der eingeführten Terminologie können wir die Abweichung Δp_x einer beliebigen Eigenschaft *p* für eine Fertigungsressource *x* in *Gl* definieren. 3. Urheberrecht

$$\Delta Pixel = Pixel - Pixel \tag{3}$$

In vielen Fällen bestehen Fertigungssysteme aus mehr Stufen als die eingeführte Automobilfertigungslinie. Daher schlagen wir eine aggregierte Sicht auf die Abweichung der Eigenschaften zwischen *s* und *s* vor. Dabei definieren wir den Fehler *E* (Gl. 4) sowie der entsprechende absolute Fehler *AE* (Gl. 5) über eine Menge *X* von Fertigungsressourcen, die die Eigenschaft *p* beibehalten.

$$E^{(X, p)} = \frac{1}{|X|} \cdot \sum_{x \in X} \Delta Pixel \tag{4}$$

$$AE^{(X, p)} = \frac{1}{|X|} \cdot \sum_{x \in X} |\Delta Pixel| \tag{5}$$

Die eingeführte Definition der Abweichung und deren Aggregation legen den Grundstein für die konzeptionelle Modellvalidierung sowie die operative Validierung, die im Folgenden erläutert wird.

4.1.1. Validierung des konzeptionellen Modells (1-fach)

Bei der konzeptionellen Modellvalidierung beschäftigen wir uns mit Unterschieden zwischen der Spezifikation der operationellen Systeme *s* und der Konfiguration des Simulationsmodells *s*. Daher betrachten wir die Abweichung der Eigenschaften in Tabelle 1, d.h. der Verarbeitungszeit *t* für jede Station innerhalb einer Gruppe und der Pufferkapazität *c*. Es könnten jedoch noch mehr Eigenschaften berücksichtigt werden,

Gruppe	<i>t</i>	<i>t</i>	Δ nicht
GA	25	25	0
GB	193	196	-3
GC	22	28	-6
GD	383	384	-1
GE	355	356	-1
GF	55	56	-1

Tabelle 2: Abweichung der Verarbeitungszeit für jede Gruppe.

Buffäh	<i>c</i>	<i>c</i>	Δc
			-4
BA/B	12		16
BB/c	22	22	0
V. Chr/d	46	42	4
BD/e	18	14	4
SEIN/f	16	8	8

Tabelle 3: Abweichung der Kapazität für jeden Puffer.

wie zum Beispiel die minimale und maximal erforderliche Last einer Station. Dabei können wir der Tatsache Rechnung tragen, dass eine Station in unserem Anwendungsfall nur ein oder zwei Werkstücke gleichzeitig bearbeiten kann. Zusätzlich kann der Eigenschaftsumfang angepasst werden, um z.B. eine geringfügige Variation der Bearbeitungszeit pro Station innerhalb einer Gruppe angemessen zu berücksichtigen.

In Tabelle 2 ist die Abweichung Δt von der zugewiesenen Bearbeitungszeit jeder Gruppe dargestellt. Wir stellen fest, dass für jede Gruppe die Bearbeitung von Werkstücken weniger Zeit in s als in s benötigt. Darüber hinaus ist in Tabelle 3 die Abweichung Δc der Kapazität für jeden Puffer aufgeführt. Es zeigt sich, dass die Abweichung zwischen den Pufferkapazitäten c und e vergleichbar hoch zu sein scheint. Es sind jedoch weitere Untersuchungen erforderlich, um die Ursache der Abweichung zu ermitteln.

Für den vorgestellten Anwendungsfall haben wir die (absolute) Abweichung der Bearbeitungszeiten für jede Gruppe in G (Gl. 6, Gl. 7) sowie die (absolute) Abweichung der Kapazität für jeden Puffer in B entsprechend (Gl. 8, Gl. 9).

$$E(G,t) = -2,00 \quad AE(G,t) = 2,00 \tag{6}$$

$$2,00 \tag{7}$$

$$E(B,c) = 2,40 \tag{8}$$

$$AE(B,c) = 4,00 \tag{9}$$

Dabei erhielten wir eine kompakte Messung als Ergebnis der konzeptionellen Modellvalidierung von s gegen s .

4.1.2. Operative Validierung (1-fach)

Für die operationale Validierung beschäftigen wir uns mit der Bewertung von Verhaltensunterschieden zwischen der Operation von s und der Simulation von s . Daher müssen nicht nur in der Umgebung von s , sondern auch innerhalb der Simulationsmaschine, die für die Ausführung von s verantwortlich ist, ~~adäquate Messverfahren implementiert werden.~~

Umfang	Eigentum	Symbol	Einheit	Beschreibung
Gruppe	Ausgabe	s	–	Gesamtanzahl der Werkstücke Verarbeitet von allen Stationen einer Gruppe für eine definierte Zeit
System	Ausgabe		ϕ	– Ausgabe der letzten Gruppe innerhalb des Systems

Tabelle 4: Eigenschaften für die Betriebsvalidierung.

Gruppe	s	s	Δs
GA		47	52 -5
GB		48	52 -4
GC		33	57-24
GD		54	54 0
GE		54	54 0
GF		49	54 -5

Tabelle 5: Abweichung der Leistung für jede Gruppe.

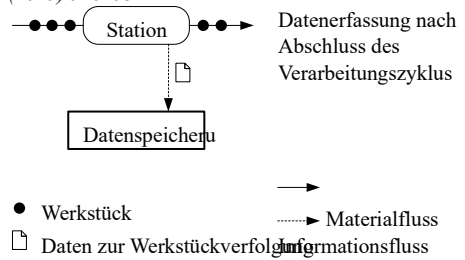


Abb. 2: Datenerfassung in Anlehnung an [8, 21].

Wie in Tabelle 4 gezeigt, konzentrieren wir uns hier auf die Gruppenleistung σ und die gesamte Systemleistung ϕ . Für die Messung des Outputs in den operationellen Systemen s und den Simulationen s stützen wir uns auf ein Datenerfassungsschema, wie es in Abb. 2 in Anlehnung an [8, 21].

Mit diesem Datenerfassungsschema verfolgen wir den Abschluss jedes Bearbeitungszyklus für jede Station und jedes Werkstück. Wir rufen den Output pro Gruppe ab, indem wir einfach die Anzahl der abgeschlossenen Bearbeitungszyklen aller Stationen innerhalb der jeweiligen Gruppe während eines definierten Zeitrahmens zählen.

Bei der Messung der Leistung von Werkstücken berücksichtigen wir von Natur aus die Zeitunterschiede sowohl in den Systemen s als auch in s , da die Leistung einer Station die Leistung einer nachfolgenden Station beeinflussen kann und umgekehrt aufgrund von Hunger oder Blockierung. Folglich sollten zeitinduzierte Verhaltensunterschiede zwischen s und s in vielen Fällen eine Abweichung der Leistung von Werkstücken pro Gruppe implizieren.

Was den vorgestellten Anwendungsfall in der Automobilindustrie betrifft, so skizziert Tabelle 5 die Abweichung $\Delta \sigma$ der generierten Leistung pro Gruppe in jedem System innerhalb von 30 Minuten nach Betrieb(en) und Simulation(en).

Wir können sehen, dass die Ausgabe pro Gruppe im Betriebssystem kleiner oder gleich der Ausgabe ist, die vom virtuellen Begleiter generiert wird. Bei G_c ist die Abweichung sehr signifikant, während bei G_D und G_E keine Unterschiede festgestellt werden können. Die Abweichung der Leistung für die übrigen Gruppen scheint im Vergleich zur Gesamtleistung des Systems nicht sehr signifikant zu sein. Aus dieser Analyse können wir die Hypothese aufstellen, dass die Ausgangsabweichung durch eine unzureichende Vorspannung der Werkstücke des Puffers BB/c in s verursacht werden kann. Es wären jedoch weitere Untersuchungen erforderlich, um die Ursache der Abweichung zu ermitteln.

Um eine komprimierte Messung für die operationelle Validierung von s gegen s zu erhalten, können wir die (absolute) Ausgangsabweichung pro Gruppe (Gl. 10, Gl. 11).

$$E(G,\sigma) = -6,33 \quad AE(G,\sigma) = 6,33 \tag{10}$$

$$6,33 \tag{11}$$

Alternativ können wir die gesamte Systemleistung ϕ (Tabelle 4) verwenden, um die Fertigungsleistung des Betriebssystems s und seines virtuellen Begleiters s zu vergleichen. Wenn Sie sich jedoch ausschließlich auf die

Gesamtsystemleistung verlassen, spiegelt dies möglicherweise keine signifikante partielle Systemabweichung wider.

Darüber hinaus können bestimmte Betriebsmessungen von verschiedenen Fertigungsressourcen erfasst und entsprechend verglichen werden, z. B. um den Materialumschlag und den Transport umfassend abzudecken.

4.2. Validierung (k-falz)

Wir übernehmen den Ansatz für die Validierung eines einzelnen Simulationszyklus (1-fache Validierung) auf die Validierung vieler Simulationszyklen (k-fache Validierung). Dazu evaluieren wir den Betrieb einer Produktionslinie *s* und die wiederholte (k-fache) Simulation eines Modells *s*. Dabei wird alle 30 min ein Simulationsmodell generiert (Schrittweite) und entsprechend für weitere 30 min (Fenstergröße) ausgeführt. Innerhalb jedes Zyklus wird sowohl die konzeptionelle als auch die operative Validierung des Modells durchgeführt. Sowohl die Schrittgröße als auch die Fenstergröße können je nach beabsichtigter Modellverwendung und Validierungsumfang angepasst werden.

Folglich befasst sich die Modellvalidierung mit zahlreichen Simulationszyklen. Daher definieren wir den mittleren Fehler *ME* (Gl. 12) sowie der absolute mittlere Fehler *MAE* (Gl. 13) über *k* Zyklen der Modellgenerierung und -simulation über eine Menge von Fertigungsressourcen *X*, die eine Eigenschaft *p* beibehalten.

$$(12) \quad \bar{X}(p) = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k ICH_i = \dots Ei(X, p)$$

$$(13) \quad MAE(\bar{X}, p) = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k AEi(X, p)$$

In dieser Definition bezeichnen *Ei* und *AEi* die zuvor eingeführte Abweichung eines Simulationszyklus *i*. Darüber hinaus gehen wir davon aus, dass die Menge der Fertigungsressourcen *X* für ein operationelles System *s* und seinen virtuellen Begleiter *s* über alle Simulationszyklen hinweg konsistent ist.

530

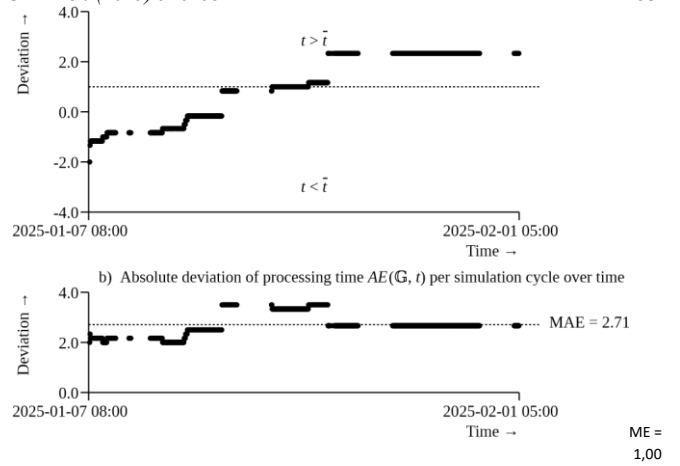


Abb. 3: Abweichung der Verarbeitungszeit pro Simulationszyklus über die Zeit.

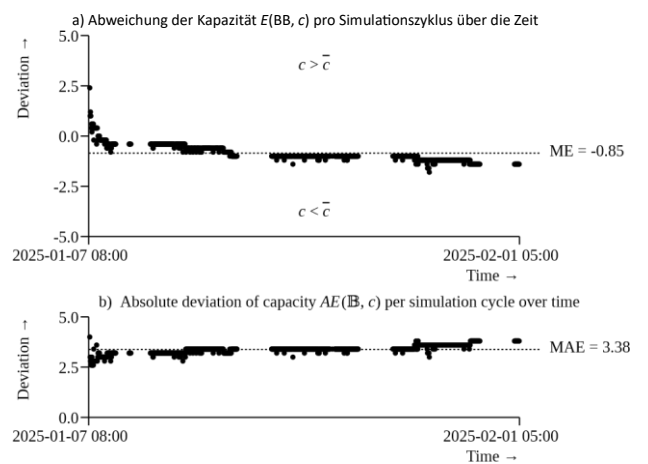


Abb. 4: Abweichung der Kapazität pro Simulationszyklus über die Zeit.

Um unseren Ansatz zu veranschaulichen, untersuchen wir den Betrieb der eingeführten Automobilproduktionslinie zusammen mit ihrer k-Fold-Simulation über einen bestimmten Zeitraum. Dabei berücksichtigen wir nur Zyklen, bei denen in der laufenden Fertigungsline mindestens ein Werkstück bearbeitet wurde. Folglich blieben insgesamt 800 Simulationszyklen für die Validierung des konzeptionellen Modells und die operative Validierung übrig, wie im Folgenden beschrieben.

4.2.1. Validierung des konzeptionellen Modells (k-falz)

In Abb. 3 wird die Abweichung der Verarbeitungszeit pro Zyklus für jede Gruppe angegeben (*ME* = 1,00, *MAE* = 2,71). In dieser Visualisierung können signifikante Lücken im Zeitverlauf ohne Daten identifiziert werden, die durch die Vernachlässigung von Zyklen ohne Leistung in der operativen Produktionslinie entstehen. Tatsächlich wird die Produktionslinie an Wochenenden nicht betrieben. Im Vergleich mit der Spezifikation der operativen Produktionslinie zeigt sich, dass die durchschnittliche Bearbeitungszeit innerhalb des Simulationsmodells in den meisten Fällen zu niedrig eingeschätzt wird.

a) Abweichung der Verarbeitungszeit *E(GG, t)* pro Simulationszyklus über die Zeit

Darüber hinaus ist in Abb. 4 die Abweichung der Kapazität pro Zyklus für jeden Puffer dargestellt ($ME = -0,85$, $MAE = 3,38$).

In den meisten Fällen wird die Puffergröße im generierten Simulationsmodell überschätzt.

Es sind jedoch weitere Untersuchungen erforderlich, um die Ursache der Abweichung zu identifizieren und den Modellgenerierungsalgorithmus anzupassen. Man sollte jedoch nicht vernachlässigen, dass einige Eigenschaften der Fertigungsmittel in der operativen Produktionslinie im Laufe der Zeit angepasst worden sein können (z.B. Pufferkapazitäten).

4.2.2. Operative Validierung (k-fold)

Das dynamische Verhalten eines Systems oder einer Simulation hängt nicht ausschließlich von spezifizierten Eigenschaften ab, sondern auch von stochastischen und situativen Effekten. Daher beschäftigen wir uns weiter mit der operativen Validierung eines Systems und seiner Begleiter. Dabei schlagen wir vor, die Ausgangsabweichung zwischen beiden Systemen innerhalb der definierten Fenstergröße auszuwerten.

Unser Ansatz wird durch die vorgestellte Automobilproduktionslinie in Abb. 5. Aufbereitung Im Rahmen dieser Visualisierung wird die prozyklische Gesamtleistung des Systems der in Betrieb befindlichen Produktionslinie und ihrer virtuellen Begleiter -in Schichten dargestellt und entsprechend eingefärbt (Abb. 5a).

Die Ausgangsabweichung ist in Abb. 5b ($ME = 0,38$). Obwohl die aggregierte Abweichung nahe Null liegt, können wir Zyklen mit einer Leistungsdifferenz identifizieren, die einen Bereich von -30 bis +30 Werkstücken überschreitet. Dementsprechend ist die Verteilung der Ausgangsabweichung in Abb. 5c. Wir sehen, dass die Abweichung der Leistung zwischen s und s_{in} in den meisten Fällen in einem Bereich von -5 bis +5 Werkstücken liegt. In mehr als 5% der Fälle überschreitet die Abweichung jedoch einen Bereich von -10 bis +10.

Zusätzlich ist die absolute Ausgangsabweichung in Abb. 5d ($MAE = 5,09$) zusammen mit seiner Verteilung in Abb. 5e, wobei der Kompensationseffekt der vorzeichenbehafteten Abweichungswerte eliminiert wird.

5. Fazit

In dieser Arbeit haben wir eine Validierungstechnik für die mehrzyklische, kurzfristige Materialflusssimulation von Fertigungssystemen eingeführt. Daher wird die konzeptionelle Modellvalidierung und die operationale Validierung eines Simulationszyklus (1-fache Validierung) diskutiert, bevor der Ansatz auf eine Reihe von Simulationszyklen übertragen wird (k-fache Validierung).

Die Validität eines Simulationsmodells ist in Bezug auf den beabsichtigten Zweck zu ermitteln [14]. Hier wird jedoch nur die Validierungstechnik eingeführt und kein allgemein akzeptabler Abweichungsbereich angegeben. Daher sollte sich die zukünftige Forschung darauf konzentrieren, eine akzeptable Genauigkeit für klar definierte Szenarien der

simulationsgesteuerten Planung und Steuerung zu bestimmen.

Darüber hinaus untersuchen wir nur eine Simulationszeit von 30 Minuten. Da die Betriebsvalidierung stark von der Simulationszeit abhängt, sind weitere Untersuchungen erforderlich, um die Auswirkungen auf die Simulationsgenauigkeit zu ermitteln.

Darüber hinaus kann sich die zukünftige Forschung auf die Integration der approximativen Modellierung in die computergestützte Simulationsmodellerstellung konzentrieren, da dies zu einer Verringerung der Abweichung bei der Betriebsvalidierung führen könnte.

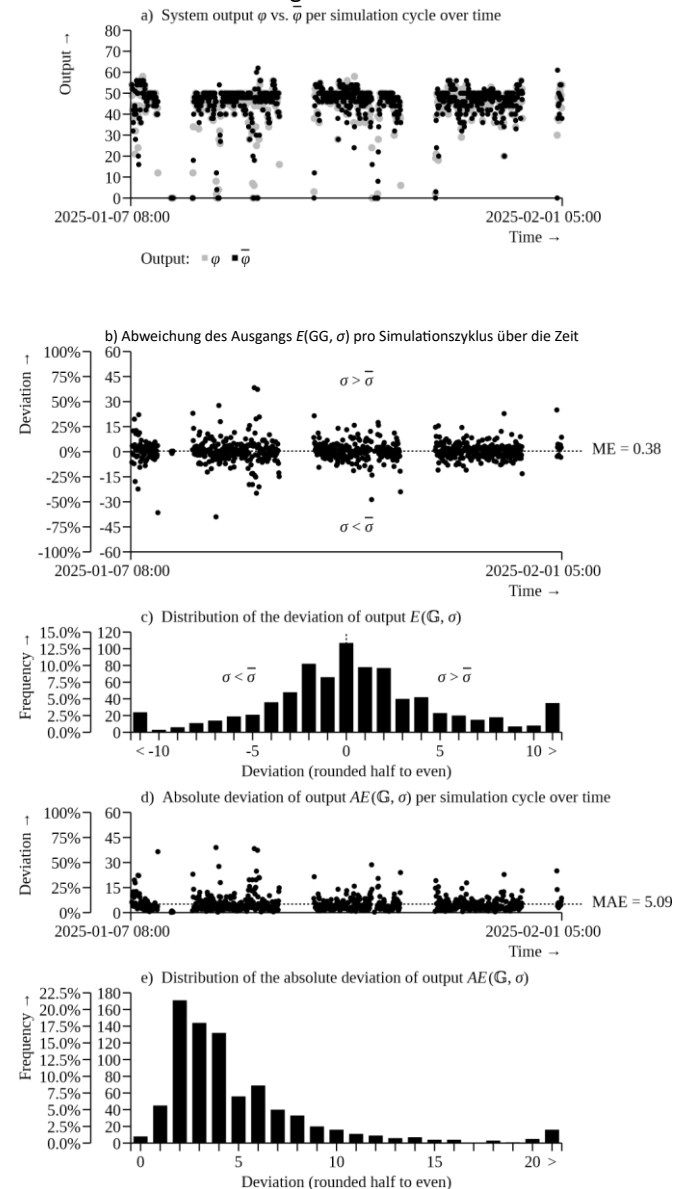


Abb. 5: Abweichung der Leistung pro Simulationszyklus über die Zeit.

Anerkennung

Diese Veröffentlichung wurde ermöglicht durch die Förderung des Forschungsprojekts KISS durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz.

Referenzen

- [1] F. Kattenstroth, J.-P. Disselkamp, J. Lick, R. Dumitrescu, Herausforderungen bei der Implementierung von Simulationsmodellen für den digitalen Fabrikzwilling - eine systematische Literaturübersicht, *Procedia CIRP* 128 (2024) 442–447. DOI: [10.1016/j.procir.2024.07.052](https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.07.052).
- [2] A. Negahban, J. S. Smith, Simulation für das Design und den Betrieb von Fertigungssystemen: Literaturrecherche und -analyse, *Journal of Manufacturing Systems* 33 (2) (2014) 241–261. DOI: [10.1016/j.jmsy.2013.12.007](https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2013.12.007).
- [3] L. V. Overbeck, Digitale Zwillinge von Produktionssystemen - automatisierte Validierung und Aktualisierung von Materialflusssimulationsmodellen mit realen Daten (2023). DOI: [10.5445/IR/1000162536](https://doi.org/10.5445/IR/1000162536).
- [4] H. Reinhardt, M. Weber, M. Putz, Ein Überblick über die automatische Modellgenerierung für die Materialflusssimulation in der diskreten Fertigung, *Procedia CIRP* 81 (2019) 121–126. DOI: [10.1016/j.procir.2019.03.022](https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.022).
- [5] G. Lugaresi, A. Matta, Automatisierte Entdeckung von Fertigungssystemen und Generierung digitaler Zwillinge, *Journal of Manufacturing Systems* 59 (2021) 51–66. DOI: [10.1016/j.jmsy.2021.01.005](https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.01.005).
- [6] M. Carl May, C. Nestroy, L. Overbeck, G. Lanza, Automatisiertes Modellgenerierungsframework für Materialflusssimulationen von Produktionssystemen, *International Journal of Production Research* 62 (1–2) (2023) 141–156. DOI: [10.1080/00207543.2023.2284833](https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2284833).
- [7] L. Overbeck, S. C. Graves, G. Lanza, Entwicklung und Analyse digitaler Zwillinge von Produktionssystemen, *International Journal of Production Research* 62 (10) (2023) 3544–3558. DOI: [10.1080/00207543.2023.2242525](https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2242525).
- [8] H. Reinhardt, M. Münnich, B. Prell, R. Arnold, F. Krippner, M. Weber, F. Seifert, M. Putz, Abrufen von Eigenschaften von Fertigungssystemen aus Rückverfolgbarkeitsdaten zur Leistungsbewertung und Materialflusssimulation, *Procedia CIRP* 104 (2021) 20–25. DOI: [10.1016/j.procir.2021.11.002](https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.002).
- [9] H. Reinhardt, J.-P. Bergmann, A. Stoll, M. Putz, Zeitliche Analyse ereignisdiskreter Alarmdaten für eine verbesserte Fertigung, *Procedia CIRP* 93 (2020) 742–746. DOI: [10.1016/j.procir.2020.04.055](https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.055).
- [10] C. Mieth, Semantische Anreicherung von räumlich-zeitlichen Produktionsdaten zur Bestimmung von Vorlaufzeiten für die Fertigungssimulation, in: 2019 Winter Simulation Conference (WSC), IEEE, 2019. DOI: [10.1109/wsc40007.2019.9004753](https://doi.org/10.1109/wsc40007.2019.9004753).
- [11] C. Mieth, A. Meyer, M. Henke, Framework für die Nutzung von Daten aus Echtzeit-Indoor-Lokalisierungssystemen zur Ableitung von Eingaben für die Fertigungssimulation, *Procedia CIRP* 81 (2019) 868–873. DOI: [10.1016/j.procir.2019.03.216](https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.216).
- [12] P. Charpentier, A. Véjar, Von raum-zeitlichen Daten zum Fertigungssystemmodell: Ein Ansatz zur Integration von Daten und Wissen, *Journal of Control, Automation and Electrical Systems* 25 (5) (2014) 557–565. DOI: [10.1007/s40313-014-0133-7](https://doi.org/10.1007/s40313-014-0133-7).
- [13] Terminologie für die Glaubwürdigkeit von Modellen, *SIMULATION* 32 (3) (1979) 103–104. DOI: [10.1177/003754977903200304](https://doi.org/10.1177/003754977903200304).
- [14] R. G. Sargent, Verifikation und Validierung von Simulationsmodellen, in: Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference, IEEE, 2010, S. 166–183. DOI: [10.1109/wsc.2010.5679166](https://doi.org/10.1109/wsc.2010.5679166).
- [15] *Handbuch der Simulation: Prinzipien, Methodik, Fortschritte, Anwendungen und Praxis*, Wiley, 1998. DOI: [10.1002/9780470172445](https://doi.org/10.1002/9780470172445).
- [16] L. Overbeck, A. Le Louarn, O. Brützel, N. Stricker, G. Lanza, Umfassende Validierungsmetriken und präzise Aktualisierung digitaler Zwillinge von Produktionssystemen, *SNE Simulation Notes Europe* 32 (3) (2022) 135–142. DOI: [10.11128/sne.32.tn.10613](https://doi.org/10.11128/sne.32.tn.10613).
- [17] L. Overbeck, A. Le Louarn, O. Brützel, N. Stricker, G. Lanza, Kontinuierliche Validierung und präzise Aktualisierung für hohe Genauigkeit von digitalen Zwillingen des Produktionssystems, in: J. Franke, P. Schuderer (Hrsg.), *Simulation in Produktion und Logistik 2021*, Cuvillier Verlag, Göttingen, 2021, S. 609–618.
- [18] K. Vernickel, L. Brunner, G. Hoellthaler, G. Sansivieri, C. Härdtlein, L. Trauner, L. Bank, J. Fischer, J. Berg, Machine-learning-based approach for parametrizing material flow simulation models, *Procedia CIRP* 93 (2020) 407–412. DOI: [10.1016/j.procir.2020.04.018](https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.018).
- [19] G. Lugaresi, S. Gangemi, G. Gazzoni, A. Matta, Online-Validierung von digitalen Zwillingen für Fertigungssysteme, *Computer in Industry* 150 (2023) 103942. DOI: [10.1016/j.compind.2023.103942](https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103942).
- [20] G. Lugaresi, S. Gangemi, G. Gazzoni, A. Matta, Online-Validierung simulationsbasierter digitaler Zwillinge unter Ausnutzung der Zeitreihenanalyse, in: 2022 Winter Simulation Conference (WSC), IEEE, 2022, S. 2912–2923. DOI: [10.1109/WSC57314.2022.10015346](https://doi.org/10.1109/WSC57314.2022.10015346).
- [21] H. Reinhardt, M. Mahdaviasl, B. Prell, A. Mauersberger, P. Klimant, J. Reiff-Stephan, S. Ihlenfeldt, Effiziente Datenerfassung für Rückverfolgbarkeit und Analytik, *Procedia CIRP* 122 (2024) 73–78. DOI: [10.1016/j.procir.2024.01.011](https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.01.011).
- [22] D. Arnold, K. Furmans, *Materialfluss in Logistiksystemen*, Springer Berlin Heidelberg, 2019. DOI: [10.1007/978-3-662-60388-8](https://doi.org/10.1007/978-3-662-60388-8).

Dies war eine Übersetzung ins Deutsche
des frei verfügbaren Fachartikels:

Original:

**„Objective validation for short-term
material flow simulation“.**

Heiner Reinhardt*,^a, Boran Bogdanow^a,
Roman Arnold^b, Bastian Prell^c,
Philipp Klimant^{a,d}, Frank Seifert^e, Mahtab
Mahdaviasl^a, Steffen Ihlenfeldt^{a,f}.

Verfügbar unter (Stand 23.6.2025):

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827125005384>

Dies war eine nicht offizielle deutsche
Übersetzung des Originals durch:

Markus Bans
ATS Prozessoptimierung Markus Bans
Web: <https://simio-simulation.de>

Lizenz:

Creative Commons Namensnennung 4.0
International (CC BY 4.0)

S.
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>