

## Motivation und existierende Herausforderungen in der Fabrikplanung

# Verbindung von BIM und Simulation

S. F. Schäfer, B. Buning, F. Bermpohl, M. Münnich, T. Krüger

**ZUSAMMENFASSUNG** Materialflusssimulation dient der Absicherung sowie der Optimierung in allen Phasen des Lebenszyklus von Fabriksystemen. Die Datenakquise ist aufwendig und beeinflusst die Simulationsergebnisse. Gleichzeitig werden in Fabrik-BIM-Modellen neben der Anordnung auch Eigenschaften von Produktionselementen modelliert. Durch die Verbindung von BIM und Simulation wären Daten gemeinsam zu nutzen. Dieser Beitrag untersucht den Stand der Technik und adressiert Herausforderungen sowie Lösungsansätze.

### STICHWÖRTER

Fabrikplanung, Industrie 4.0, Simulation, Digitaler Zwilling, Datenmanagement, Building Information Modeling

## Linking BIM and simulation - Motivation and existing challenges in factory planning

**ABSTRACT** Material flow simulation is used for validation and optimization in all phases of the life cycle of factory systems. Data acquisition is complex and influences the simulation results. At the same time, properties of production elements are modeled in factory BIM models in addition to the layout. By combining BIM and simulation, data could be shared. This article examines the state of the art and addresses challenges and possible solutions.

## 1 Motivation

Aktuelle Entwicklungen bei der Planung und dem Betrieb von Fabriken sind unter anderem geprägt von abnehmenden Planungszeiträumen durch reduzierte Prognosehorizonte sowie höhere dynamische Wechselwirkungen [1]. Dadurch wird die Fabrikplanung kurzzyklischer und gleichzeitig nimmt die Relevanz der Informationsdurchgängigkeit stetig zu [2]. Insbesondere die Datendurchgängigkeit zwischen den verschiedenen Stakeholdern und ihren Tools ist dabei eine große Herausforderung [3].

Die dynamischen Wechselwirkungen bedingen, dass eine Fabrik mittels Simulation<sup>1</sup> ausgelegt beziehungsweise die Planung abgesichert und optimiert werden sollte, da das Informationsgeflecht die Fähigkeiten einer Betrachtung mittels statischem Mengengerüst überschreitet. Es ist schlicht nicht möglich, „eine Fabrik mit einer Excel-Datei“ [auszulegen]“ [1]: Die heutigen Fabrik- und Produktionssysteme sind dafür zu komplex, da sie brüchigen Umwelteinflüssen, wie dem Übergang von VUCA<sup>2</sup> zu BANI<sup>3</sup>, unterworfen sind. Darüber hinaus müssen Fabrik- und Produktionssysteme an neue Zielkriterien, wie beispielsweise dem

Abgleich von Produktions- und Energieflexibilität, angepasst werden. Als ein Beispiel sei hier die Betrachtung der Produktionskennzahlen bei Einführung zusätzlicher Optimierungskriterien wie der Energienutzung am Shopfloor genannt.

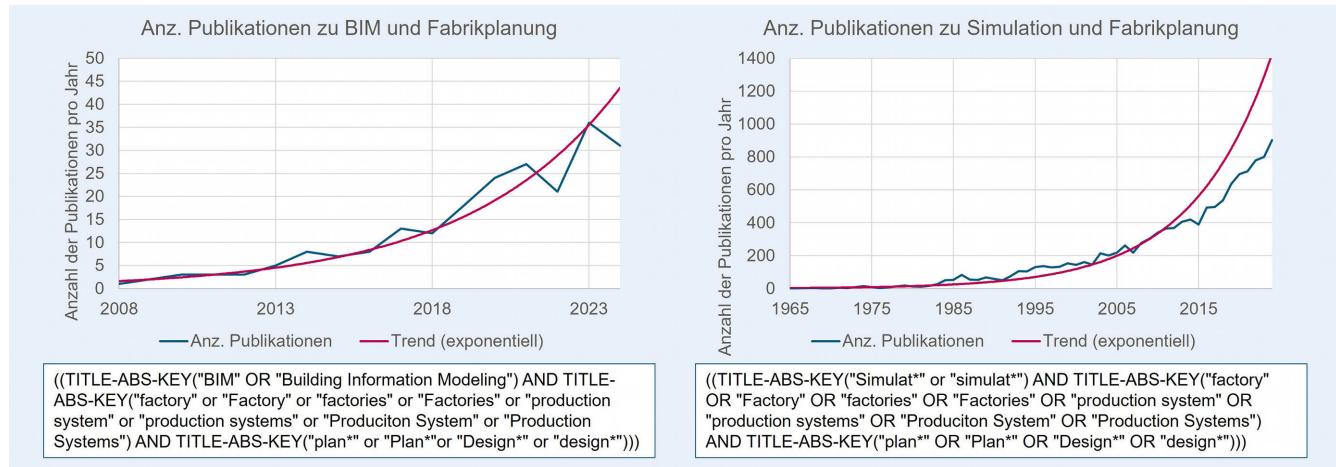
Diesen Herausforderungen begegnen die Planungsbeteiligten mit verschiedenen Werkzeugen und Methoden der Digitalen Fabrik, welche durch „ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden“ [4]. Jedoch ist gerade diese Durchgängigkeit im Falle von zwei etablierten und grundlegenden Methoden der Fabrikplanung bislang nur unzureichend gelöst: Auf der einen Seite steht die Materialflusssimulation, welche vornehmlich statische Planungsergebnisse im dynamischen Umfeld prüft sowie Optimierungsmöglichkeiten aufzeigen und absichern soll. Auf der anderen Seite steht die aus dem Bauwesen adaptierte Methodik BIM (Building Information Modeling), welche die objektorientierte Modellierung von statischen Fabrikelementen in die Fabrikplanung integriert. Im Zuge der Modellierung werden umfangreiche Informationen zu diesen Elementen abgelegt, die im Simulationsmodell verarbeitet werden. Leider existiert hierzu kein standardisierter Workflow, da ebenso keinerlei integrierbare Datenstandards vorliegen. Dies führt zu Doppelarbeit, Informationsverlusten und teilweise redundanten Modellen, die manuell abgeglichen werden müssen. Potentiale wie der generative Aufbau von Simulationsmodellen bleiben ungenutzt, da sie nur realisierbar sind, wenn der manuelle Modellierungsanteil möglichst gering ist. Dieser Beitrag stellt den aktuellen Stand der Technik dar und zeigt Handlungsnotwendigkeiten auf.

In einer Umfrage unter Simulationspraktikern wurde der Aufwand für die Datenakquise und Vorverarbeitung auf etwa 28 %

1 In diesem Beitrag ist mit dem Begriff Simulation schwerpunktmaßig die Materialflusssimulation gemeint

2 VUCA: Beschreibung der Unternehmensumgebung durch die Hauptfaktoren Volatility (Volatilität), Uncertainty (Unsicherheit), Complexity (Komplexität) und Ambiguity (Mehrdeutigkeit)

3 BANI: Beschreibung der Umgebungseinflüsse durch die Hauptfaktoren Brittle (brüchig), Anxious (ängstlich), Non-linear (nicht linear), Incomprehensible (nicht fassbar)



**Bild 1.** Entwicklung der Anzahl der Publikationen pro Jahr zu den Themen BIM und Simulation im Kontext der Fabrikplanung. *Grafik: Fraunhofer IGCV*

geschätzt und nimmt damit einen relevanten Aufwand der gesamten Simulationsstudie ein [5]. Dies deckt sich ebenfalls mit Daten aus der Vergangenheit, die ebenfalls etwa 25 % des Zeitaufwandes in der Datenerfassung zugeordnet wurden [6]. Trotz der Etablierung der Simulation als Methode in der Fabrikplanung und der besseren Anpassung der Werkzeuge an Nutzerbedürfnisse, hat sich der Aufwand zur Datenakquise nicht wesentlich verändert.

Ebenso führen mehr Produkte, höhere Variantenzahlen und komplexe heterogene Prozesse dazu, dass viele Prozessexperten in der Phase der Datenakquise befragt werden müssen. Dadurch verlängert sich dieser Prozess der Datenakquise zusätzlich [5]. Dieser Aufwand kann in der Tendenz in einer zunehmend datenintensiveren Fabrikplanung weiter steigen, da Eingangsdaten ebenfalls stärker zwischen unterschiedlichen Fachdomänen aufgeteilt werden und weitere Speicherorte beispielsweise cloudbasiert oder in mehreren verteilten betrieblichen Informationssystemen aufbewahrt werden.

Besonders Ansätze wie die automatische Modellgenerierung sind auf valide und aktuelle Datenbasen angewiesen, wodurch ein Bedarf nach synchronisierter und digitaler Planung in der Fabrikplanung im Allgemeinen, aber auch für Simulationsprojekte im Speziellen entsteht. Die strukturierte Aufbereitung und Ablage der Daten sind für diese Ansätze zur automatisierten Modellgenerierung erforderlich. Die bisherigen Anforderungen an Datenmenge und -qualität sowie die eingeschränkte Anwendbarkeit stellten in der Vergangenheit erhebliche Hindernisse zur Etablierung einer automatisierten Generierung von Modellen dar, trotz der erkannten Relevanz für die Praxis und des langen Zeitraums, in dem die Ansätze bereits untersucht wurden [7].

Um der steigenden Planungskomplexität sowie den kürzer werdenden Planungsszyklen mit einer gleichzeitig hohen Qualität in der Planung gerecht zu werden, bildet die durchgängige Nutzung von BIM und Simulation eine wesentliche Grundlage. Generell werden diese Methoden jedoch getrennt eingesetzt. Eine Rückkopplung oder bidirektionale Verbindung beider Tools ist derzeit noch nicht standardisiert. Gerade hier liegt ein großes Potential, die Planung abzusichern, zu beschleunigen und bis in die Betriebsphase ein aktuelles dynamisches Modell von Gebäude und Produktion zu pflegen.

## 2 Stand der Wissenschaft und Technik

Eine strukturierte Literaturrecherche bestätigt die These, dass die Betrachtung von BIM und Simulation in der Fabrikplanung bislang vor allem getrennt erfolgt. Wenngleich die Trends für sich genommen jeweils einen exponentiellen Anstieg an Publikationen aufweisen (vgl. **Bild 1**), ist dies bei der gemeinsamen Betrachtung nicht der Fall.

Dabei ist BIM im Vergleich zur Simulation in der Fabrikplanung ein „neuerer Trend“, da ein Großteil der Publikationen erst nach 2020 veröffentlicht wurde. Der Einsatz von Simulation hingegen hat sich als eine wesentliche Methode der digitalen Fabrik [4] bereits seit Jahrzehnten in der Fabrikplanung etabliert und bietet insbesondere bei der Gestaltung hochkomplexer Materialflussysteme hohe Mehrwerte [8]. Neben den technisch-logistischen Fragestellungen wie zum Beispiel der Dimensionierung von Puffern oder der Prüfung von Taktzeiten gewinnen zunehmend auch ökologische Fragestellungen an Relevanz [9], sodass Simulationsumgebungen um entsprechende Mechanismen und Schnittstellen erweitert werden. Mourtzis [8] konnte in einer Metaanalyse zeigen, dass sich die meisten wissenschaftlichen Publikationen zu Simulation in Produktionssystemen mit der Planungsphase beschäftigen. Dennoch spielt Simulation auch während der Betriebsphase eine Rolle. Aus Sicht der praktischen Anwendung konkretisiert die VDI3633-1 das Vorgehensmodell weiter und stellt die Verifikation und Validierung sowie die Datenerfassung und -aufbereitung separat heraus als weitgehend parallele Prozesse zur Konzeptionierung, Formalisierung und Erstellung des Modells [10]. Mit zahlreichen Publikationen zur Anwendung von Simulation, [zum Beispiel 11–14], ist diese ein fester Bestandteil komplexer Fabrikplanungsprojekte.

Gleichzeitig konnten Elshabshiri *et al.* [15] in einer Metaanalyse zeigen, dass sich Publikationen zum Thema BIM häufig auf einer konzeptionellen Ebene bewegen. Neuhäuser *et al.* [16] konnten in einer ersten Studie die Relevanz von BIM in der Fabrikplanung belegen. Zentrales Merkmal der Übertragung der aus der Gebäudeplanung stammenden kollaborativen Arbeitsmethodik auf die Fabrikplanung ist die Integration zusätzlicher Stakeholder (unter anderem Layout-, Logistik- und Anlagenplanung) aus der Fachdomäne der Produktionssystemplanung zusätzlich zu den aus der Domäne des Gebäudes bereits bekannten Stakeholdern [17, 18]. Im Rahmen der BIM-basierten Fabrikplanung werden

die Planungsmodelle aller Stakeholder in digitalen BIM-Gesamtmodell zusammengeführt [19, 20] und koordiniert [21]. Im BIM-Gesamtmodell ergibt sich eine ganzheitliche statische Repräsentation aller Objekte der Fabrik [9]. Als Vorläufer kann das F-DMU (Fabrik-Digital-Mock-up) angesehen werden [vgl. 22]. Auch hier sind die wesentlichen Weiterentwicklungen die Modellierung von alphanumerischen Eigenschaften sowie die Koordination des Produktionssystems mit der Objektplanung. Dies geht weit über die beim „klassischen“ BIM vorgenommene Koordinierung von Planungsdisziplinen (beispielsweise Architektur und TGA beziehungsweise Layout- und Betriebsmittelplanung) heraus – daher haben Schäfer *et al.* den übergeordneten Begriff der Fachdomäne für das Produktionssystem und die Objektplanung eingeführt sowie das LOC als Level of Coordination zwischen diesen Domänen beschrieben [23]. Generell ist eine weitreichende Ausdehnung des Begriffs BIM<sup>4</sup> zu sehen, so dass auch der Richtlinienausschuss der VDI-EE 2552 11.8 schlussendlich die Nutzung des Begriffs FIM (Factory Information Modeling) in Aussicht gestellt hat [24].

Darüber hinaus konnten Bempohl *et al.* [25] in einer weiteren Studie zeigen, dass Fabrikbetreiber für die Fabrikplanung neben dem verstärkten Einsatz von Simulation vor allem die Einführung von BIM als relevant für die Zukunft sehen. Bei einem gleichzeitig steigenden Bedarf von Datenaustausch zwischen Stakeholdern und den eingesetzten Tools im gesamten Planungsprozess [3] ist auch die Datendurchgängigkeit zwischen BIM und Simulation von zentraler Bedeutung.

Im Zuge der strukturierten Literaturrecherche wurden in der Datenbank Scopus nur 45 Treffer für die Verbindung von BIM und Simulation in der Fabrikplanung gefunden. Dabei wurde der folgende Suchstring verwendet:

(TITLE-ABS-KEY („Building Information Modeling“ OR „BIM“) AND TITLE-ABS-KEY („factory“ OR „Factory“ OR „factories“ OR „Factories“ OR „production system“ OR „production systems“ OR „Producton System“ OR „Production Systems“) AND TITLE-ABS-KEY („plan\*“ OR „Plan\*“ OR „Design\*“ OR „design\*“) AND TITLE-ABS-KEY („Simulat\*“ OR „simulat\*“))

Bei diesen 45 Quellen handelt es sich in zehn Fällen um Tagungsbände, in welchen die Schlagworte thematisch in einzelnen Arbeiten betrachtet werden, jedoch nicht in Kombination. In den verbleibenden 35 Quellen betrachten 34 Quellen das Thema BIM. Eine Ausnahme bilden Schoch und Russell, die sich mit einer Übertragung des Toyota Production System auf die Planung und Ausführung nachhaltiger Industriebauten beschäftigen [26]. Zwei weitere Arbeiten beschäftigen sich mit der Lehre von BIM für Architekten und Bauingenieure [27, 28].

Jeweils vier weitere Arbeiten beschäftigen sich mit der Schnittstelle zwischen BIM und dem Aufbau eines Digitalen Zwilling [29–32] und der Visualisierung von BIM [33–36]. Ein konkreter Bezug zu Simulation fehlt in all diesen Arbeiten.

Die Verbindung von BIM und Simulation wird vor allem im Kontext der 4D-Bauablaufssimulation [28, 37–44], im Kontext des modularen Bauens mittels industriell vorgefertigter Module [45–49], sowie teilweise in Kombination von Bauablaufsimulation und der Modulvorfertigung [50–52] diskutiert. Darüber hinaus beschäftigen sich einige Autoren mit der Planung und

Simulation nachhaltiger Energieversorgungssysteme auf Basis von BIM [53–55]. Jeweils eine Quelle thematisiert die Simulation von geometrischen Kollisionen [56], Sicherheitsaspekten [57] sowie thermischen Prozessen [58] auf Basis von BIM.

Ein Bezug zu konkreten Anwendungsfällen ist in 16 Veröffentlichungen gegeben [27, 28, 33–36, 38–40, 45, 46, 48, 52, 56, 57]. Ein konkreter Bezug zur für die Fabrikplanung wichtigen Materialflusssimulation fehlt jedoch in all diesen Quellen. Insgesamt verbleiben zwei Quellen, welche sich mit der Verbindung von BIM und Materialflusssimulation für die Fabrikplanung beschäftigt haben.

Neuhäuser *et al.* [59] beschreiben, dass die Integration von BIM und Simulation die automatische Bewertung von Fabriklayouts ermöglichen kann. Die Autoren weisen die Potenziale im Rahmen eines vereinfachten Labor-Anwendungsfalls für ausgewählte KPIs nach. Süße *et al.* haben die Herausforderung erkannt, dass die für Materialflusssimulation erforderlichen Daten dafür bereits im BIM-Modell integriert werden müssen. Sie beschreiben ein modulares Framework, um diese Anforderungen an die Erstellung der BIM-Modelle zu Beginn eines Fabrikplanungsprojektes in Form eines Information-Delivery-Manual (IDM) zu definieren [60]. Die konkrete Ausgestaltung der Schnittstelle zwischen BIM und Simulation wird von den Autoren nicht adressiert.

Die Verbindung von BIM und Simulation ist demnach in keinem der beschriebenen Fälle durchgängig gelöst. Um die zugrundeliegenden Herausforderungen zu identifizieren und potenzielle Handlungsempfehlungen zur Überwindung dieser Herausforderungen abzuleiten, ist es notwendig, die zunächst die Anforderungen an diese Verknüpfung festzustellen sowie bestehende Brüche in der digitalen Durchgängigkeit zu analysieren.

### 3 Anforderungen an die Verknüpfung von BIM und Simulation in der Fabrikplanung

In vergangenen Arbeiten zur Erstellung von Simulationsmodellen auf alternativen Datengrundlagen hat sich insbesondere das (teil)automatisierte Verarbeiten dieser Eingangsdaten im Sinne einer digitalen Informationsdurchgängigkeit als eine relevante Anforderung gezeigt [vgl. 61]. Bei der Simulation entstehen durch Aggregation, Aufbereitung und Integration der Daten neue Planungsinformationen [10]. Um die Herausforderungen der getrennten Betrachtung in Datensilos zu überwinden, ist ein Rückfluss dieser in der Simulation generierten Informationen in das Fabrik-BIM-Modell als Informationsspeicher notwendig, damit dieses über den gesamten Verlauf des Planungsprozesses den korrekten Planungsstand abbildet.

Im Wesentlichen besteht demzufolge die Anforderung, bidirektional und idealerweise (teil)automatisiert Daten zwischen dem Fabrik-BIM-Modell als Informationsspeicher und der Simulation zu erreichen. Nur so kann der Planungsprozess bis zur Inbetriebnahme mit stets aktuellen und optimierten Modellen erfolgen. Diese Informationsflüsse sollen im weiteren Verlauf dieses Kapitels analysiert und Brüche in der digitalen Datendurchgängigkeit analysiert werden.

Die im erweiterten Fabrik-BIM-Modell enthaltenen Daten teilen sich in geometrische und alphanumerische Daten auf. Geometrische Daten enthalten sowohl Abmessungen, Anstell- und Sperrflächen als auch Verordnungen (Koordinaten), das heißt räumliche Beziehungen von Fabrikelementen zueinander. Alpha-

4 Im weiteren Verlauf der Arbeit wird dieses erweiterte BIM Verständnis als Fabrik-BIM bezeichnet.

numerische Daten können weitere Eigenschaften der Elemente speichern, wie zum Beispiel technische Eigenschaften von Betriebsmitteln. Grundsätzlich sind diese Eigenschaften statischer Natur, das heißt ohne strukturelle Eingriffe unveränderlich. Ein Export in gängige Datentypen, wie Betriebsmittellisten oder CAD-Layouts, ist jederzeit möglich.

Bei der standardisierten Datenspeicherung und -übertragung ist zu beachten: Während Gebäudeelemente wie Türen etc. in maßgeblichem Umfang bereits in Objektbibliotheken von Herstellern abrufbar sind, werden Produktionselemente derzeit noch projektspezifisch abgestimmt und sind nicht standardisiert. Gebäudeelemente werden in der Folge zum Beispiel in einem IFC eindeutig lesbar in „IfcBuildingElements“ übermittelt, während „IfcProductionElement“ bislang nur als Forderung existiert [zum Beispiel 17]. Gleches gilt für die Speicherung der Eigenschaften des Produktionssystems in nativen Formaten etc.: Die Datenablage wird häufig noch projektspezifisch abgestimmt. Dies bietet auf der einen Seite große Freiheitsgrade bei der Modellierung, schränkt aber auch die hier adressierte Interoperabilität mit anderen Softwares – wie beispielsweise Simulationstools – ein.

Im BIM-Produktionssystem-Koordinationsmodell erfolgt die Speicherung aller Ergebnisse aus Produktionssystem und Layoutplanung. Dies ist die zentrale Datenquelle der Fabrikplanung, wenn mit BIM gearbeitet wird. Aus diesem werden alle Ergebnisse abgeleitet. So zum Beispiel der Export für ein 3D-Fabrikmodell oder ein 2D-Layout.

Die Betriebsmittelliste ist eine zentrale Datenquelle für das BIM-Produktionssystemmodell. Sie dient der Parametrisierung aller im BIM enthaltenden Produktionselemente. Nach dem initialen Befüllen wird diese Liste vom BIM-Modell als „Single Source of Truth“, d.h. dem führenden Datenbestand sowohl was die Parameter als auch das Layout betrifft, abgelöst. Im weiteren Projektverlauf kann über Ex- und Import-Funktionen die Betriebsmittelliste – in gängigen Office-Formaten – genutzt werden, um Nutzereinheiten anzubinden, welche originär nicht BIM-fähig sind (vgl. oben. Hier: beispielsweise Planungsdisziplin „Betriebsmittelplanung“). Dies erfolgt technisch über einen Hash, welcher die einzelnen Elemente wie ein digitaler Fingerabdruck begleitet und Anpassungen in den Betriebsmittellisten automatisiert rückführbar in das BIM-Modell macht. In gleicher Art und Weise können auch Nutzeranforderungen an Raumparameter aufgenommen und ins Modell eingespielt werden. Über dieses stehen die gesammelten Anforderungen („Lastenheft“) dann der Objektplanung zur Modellierung des Gebäudes („Pflichtenheft“) zur Verfügung. (Für diesen weiteren Workflow siehe [20, Figure 6, ff.]). Als weitere Datenquelle können 3D-CAD-Modelle des Produktionssystems eingebunden werden. Je nach Verfügbarkeit werden aber auch 2D-Zeichnungen zur Modellierung von Abstandsfächern, Anstellbereichen, Arbeits- und Bewegungsflächen etc. zur Hilfe genommen. Schlussendlich liegen im Fabrik-BIM-Modell alle Informationen des Produktionssystems vor, welche aus Dimensionierung, Anordnung, Typbestimmung etc. hervorgegangen sind.

Für ein Materialflusssimulationsmodell werden als Dateninput 2D-Layoutdaten, 3D-CAD-Modelle sowie Prozessinformationen benötigt. Hierbei kann nur ein Teil des Datenflusses aus dem Fabrik-BIM-Modell dargestellt werden. BIM-Daten, welche in einem Simulationsmodell verarbeitet werden, bestehen zumeist nur aus Layoutdaten in der Simulationsmodellerstellung. In seltenen Fällen werden Eigenschaftsinformationen über die Betriebs-

mittelliste (teils händisch) zur Modellierung von Prozessen genutzt. Essenzielle Daten der Prozessbeschreibung sind im BIM-Modell nicht vorhanden und werden separat ermittelt und modelliert. Darin wird deutlich, dass das volle Potential von BIM als „Single Source of Truth“ nicht ausgeschöpft wird. (Anm.: Hier ist zukünftig zu überprüfen, ob und wie diese Informationen im BIM-Modell abgebildet werden können und welche Anpassungen dafür notwendig sind).

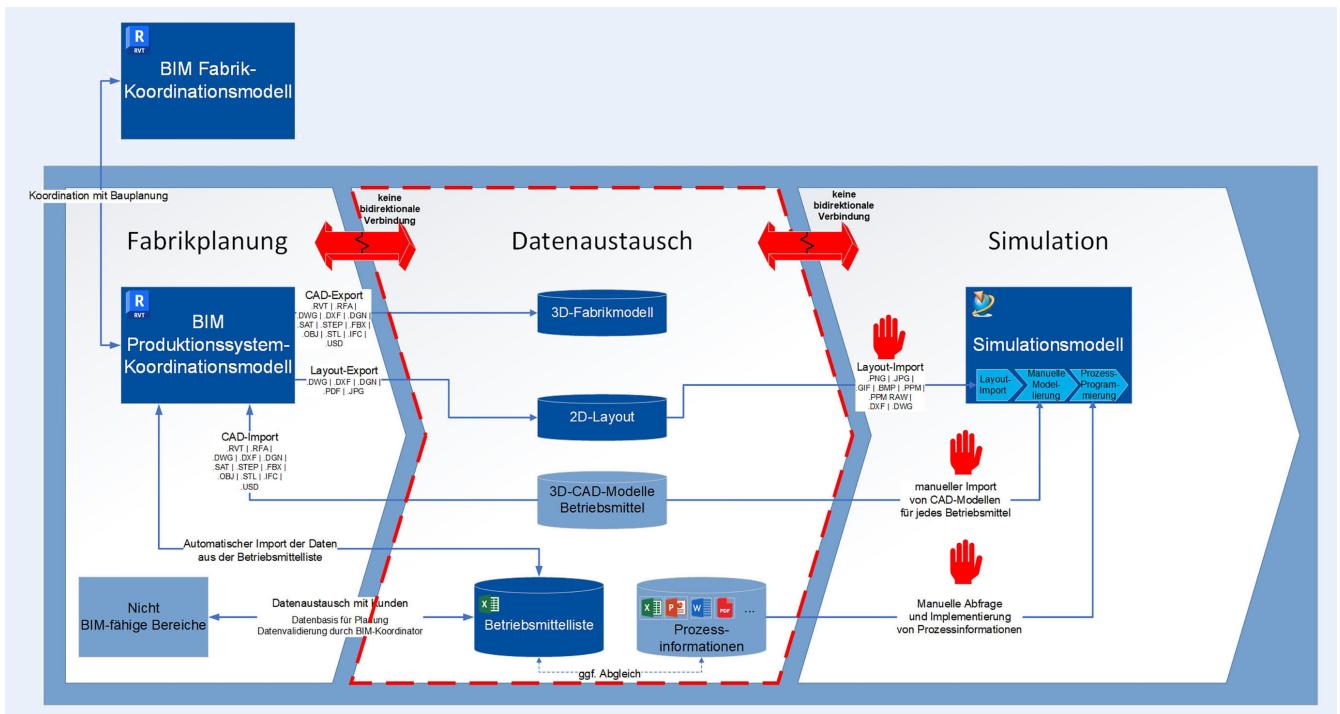
Zu diesem Datenfluss gibt es keinen gerichteten Rückfluss aus der Simulation in das Fabrik-BIM-Modell. Dies führt zu einer einseitigen Informationsverarbeitung und begrenzt die Möglichkeit, Simulationsergebnisse zur Optimierung der Planung zu nutzen.

Schlussendlich entstehen so zwei Modelle, welche zu wesentlichen Teilen auf denselben Daten basieren und durch eine Vielzahl manueller Schnittstellen verbunden sind. Doppelte Datenerhebung, inkonsistente Modelle und hohe Verifikations- und Validierungsaufwendungen sind die Resultate. **Bild 2** veranschaulicht den aktuellen Stand der Technik des Informationsflusses zwischen BIM- und Simulationsmodellen inklusive der damit verbundenen Schnittstellen. Das Grundverständnis und die entsprechende Beschreibung folgen dabei dem erweiterten BIM-Verständnis (s.o.). Im Bild nicht berücksichtigt sind die Schnittstellen zur Planungsdomäne „Objektplanung“. Hierzu sei auf einschlägige Vorarbeiten der Autoren verwiesen [unter anderem 19, 20, 23, 24].

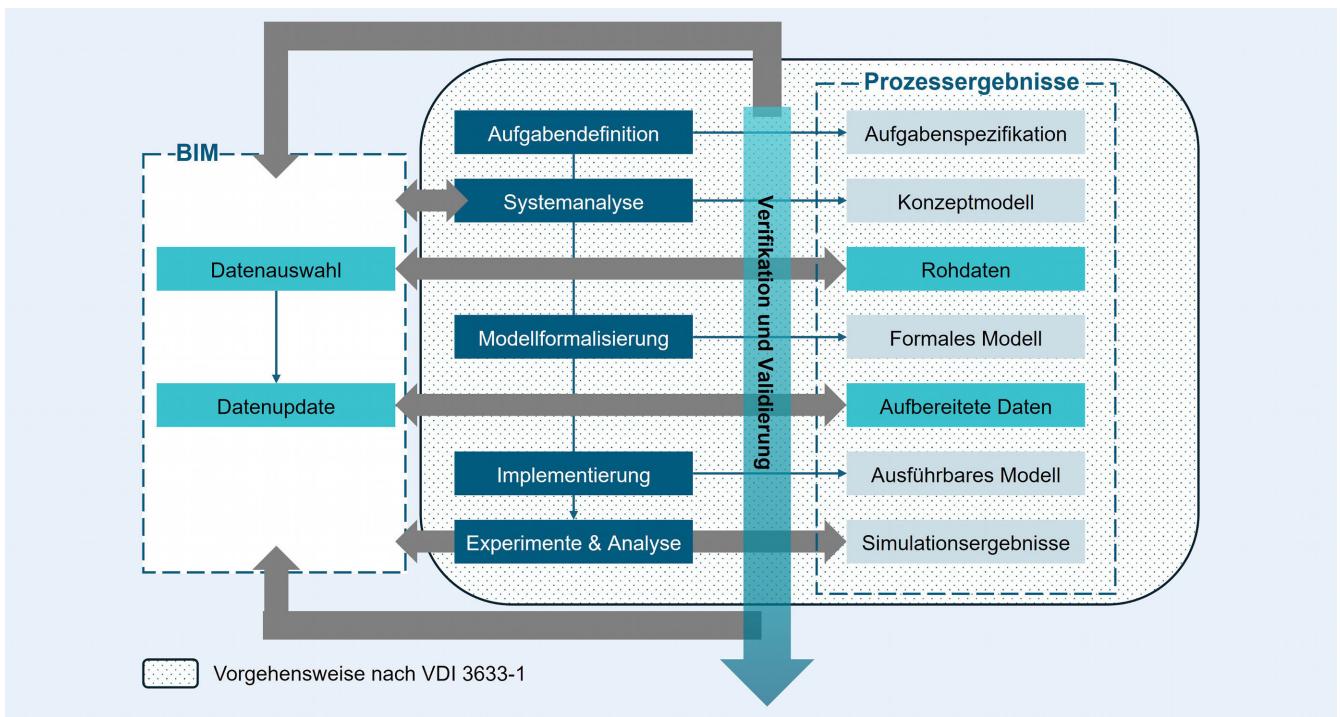
Eine zentrale Datenspeicherung, erweitert um einen gerichteten Informationsrückfluss zurück aus den Simulationsmodellen in Richtung des BIM-Modells, und eine bestenfalls standardisierte Schnittstelle für alle benötigten Informationen, wird dabei bislang nicht erzielt. Die Autoren stellen die These auf, dass die durchgängige Integration der BIM-Daten zudem die Genauigkeit und Effizienz von Simulationsmodellen sowie deren Erstellung erheblich verbessern und eine realitätsnahe Darstellung und Analyse der Planungsprozesse ermöglicht kann.

## 4 Zielbild der Verknüpfung von BIM und Simulation für die Fabrikplanung

Zur Erreichung der Verknüpfung von BIM und Simulation für die Fabrikplanung schlagen die Autoren daher die Integration der BIM Prozesse in das Vorgehensmodell der VDI 3633-1 vor. Das Vorgehen zur Durchführung der Simulationsstudie selbst bleibt dabei im Kern gleich, jedoch wird die zuvor als Herausforderung identifizierte aufwendige Datenakquise über die Schnittstelle zum Fabrik-BIM-Modell abgebildet. Sofern während der BIM-Modellierung die Datenbedarfe der Simulation berücksichtigt werden, reduziert sich diese Datenakquise zu einer Datenauswahl entlang des IFC-Schemas. Ferner können in diesem Zusammenhang die unidirektionalen Verbindungen zu bidirektionalen Verbindungen erweitert werden, sodass im Rahmen eines Datenupdate ein kontinuierlicher Austausch zwischen den Datenbasen der BIM-Modelle und Simulationsmodelle entsteht. Darüber hinaus sollen die finalen Simulationsergebnisse zurückgeführt werden können, um ausgehend vom Fabrik-BIM als zentralem Wissensspeicher für andere Planungsgewerke verfügbar zu sein. Die Erweiterung des Vorgehensmodells zur Durchführung von Simulationsstudien der VDI 3633-1 um eine Schnittstelle zum Fabrik-BIM-Modell wird in **Bild 3** schematisch aufgezeigt.



**Bild 2.** Stand der Technik – Beispielhafte Anbindung von BIM und Simulation. *Grafik: Ingénierie Consulting*

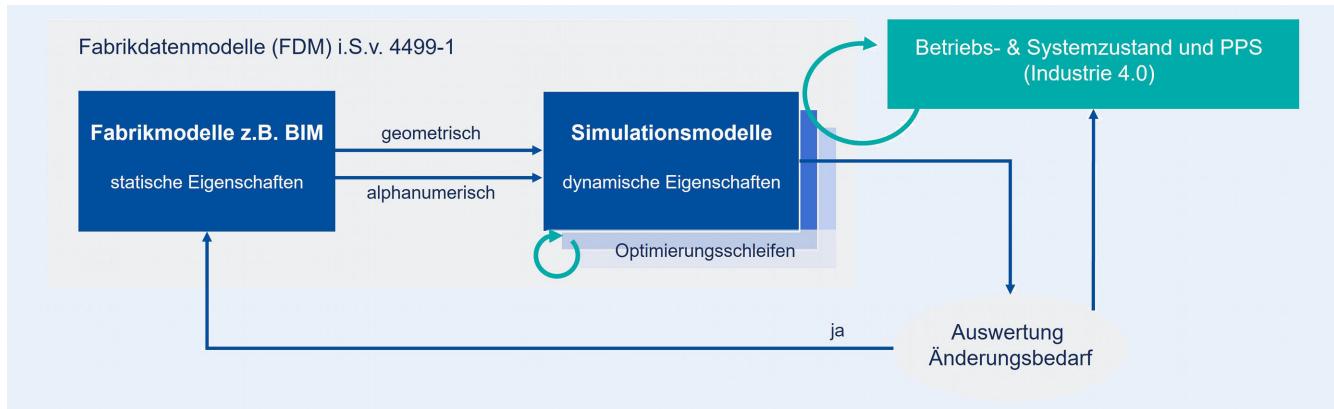


**Bild 3.** Schematisches Vorgehensmodell basierend auf VDI 3633-1 mit Integration der BIM-Methodik. *Grafik: Fraunhofer IWU*

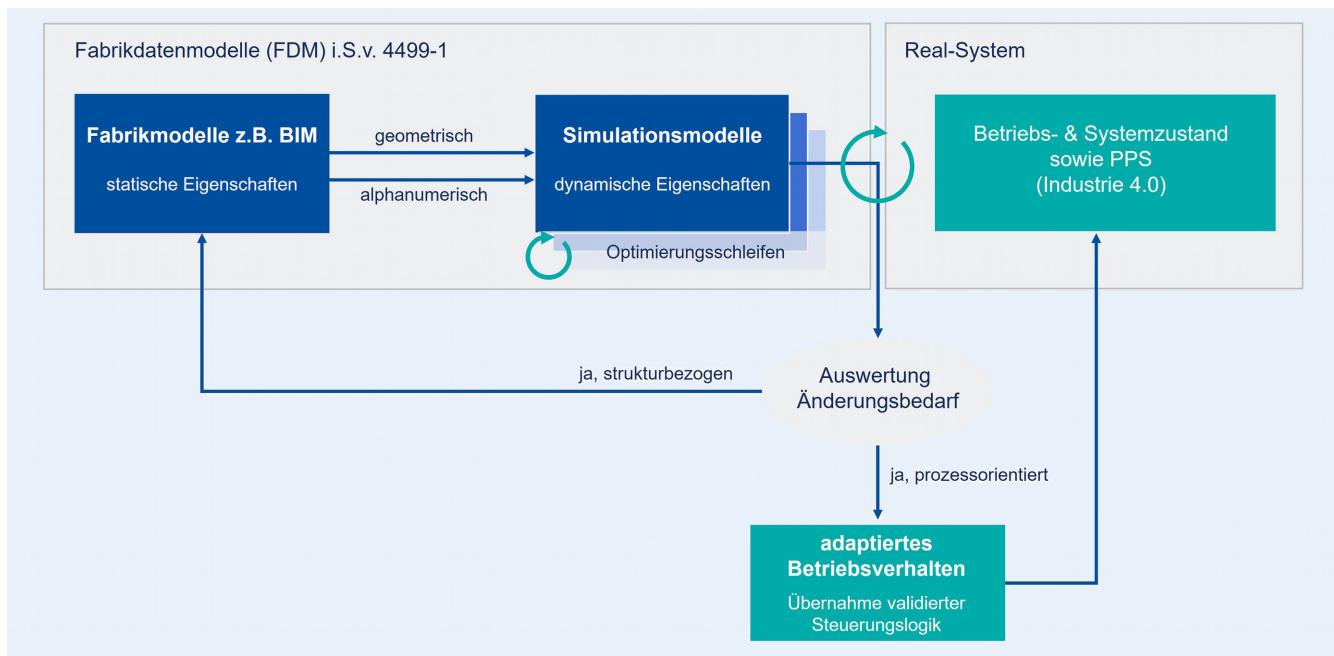
Zusammengefasst profitiert Simulation von der Synchronisation aller Daten der Planungsgewerke, der Unterstützung der Verifikation und Validierung sowie der Beherrschung der Komplexität in der datenintensiven Fabrikplanung. Umgekehrt können Simulationsergebnisse als valide Planungsergebnisse in die Datenbasis von BIM-Modellen überführt werden. So kann ebenfalls eine Anpassungsplanung mit einer bestehenden Datenbasis durchgeführt werden und neue Planungsdaten in die bestehenden BIM-Fabrik-

modelle übertragen werden. Zur Erreichung dieses Zielbildes besteht der Bedarf, zwei konkrete Workflows zu realisieren, welche nachfolgend beschrieben werden:

1. Nutzung von BIM und Simulation in der Planungsphase einer Fabrik (**Bild 4**)
2. Nutzung von BIM und Simulation in der Betriebsphase einer Fabrik (**Bild 5**)



**Bild 4.** Zielbild der Verbindung von BIM und Simulation im Fabrikplanung. *Grafik: Ingenics Consulting*



**Bild 5.** Zielbild der Verbindung von BIM und Simulation im Fabrikbetrieb. *Grafik: Ingenics Consulting*

Im Falle des Einsatzes von BIM und Simulation zur Planung einer Fabrik werden die Ergebnisse der Fabrikplanung in dem BIM-Modell modelliert. Die alphanumerischen und geometrischen Daten statischer Natur werden dann für den Aufbau eines Simulationsmodells genutzt. In diesem wird die Planung optimiert und abgesichert (zum Beispiel durch Auslegung von Speichergrößen u.ä.). Anschließend erfolgt die Auswertung. Sollten die Experimentläufe hierbei Potentiale in der Auslegung, Dimensionierung etc. ergeben, so werden diese auf strukturelle Anpassungsnotwendigkeiten überprüft. Wenn sich dabei Auswirkungen auf die Planung ergeben, so werden die Erkenntnisse als neue Datengrundlage in das BIM-Modell überführt. Anschließend wird der Regelkreis erneut gestartet. Sollte sich keine weitere Verbesserung mehr ergeben, so wird die vorliegende Datenbasis in die Realisierungsplanung überführt und die durch Experimente abgesicherte Fahrweise wird als initiale Steuerungslogik für den Betrieb dem Ramp-up bereitgestellt.

Nach dem Hochlauf der Fabrik können und sollten BIM und Simulation auch in dem Betrieb weitergenutzt werden. Hierbei werden weiterhin die statischen Eigenschaften der Produktions-

elemente aus dem BIM-Modell der Simulation für ihre Modelle bereitgestellt. Aktuelle Systemzustände etc. werden über Industrie 4.0-Systeme in die Simulation eingespielt. Sollten in den Optimierungsschleifen Potenziale auftreten, welche eine Anpassung der Steuerung erfordern, so werden diese dem Industrie 4.0-System bereitgestellt. Strukturelle Anpassungen (beispielsweise eine neue Maschine, Änderung der Anzahl logistischer Systemelemente etc.) werden im BIM-Modell modelliert und in die Ausführung übergeben.

## 5 Diskussion und Handlungsbedarf

Bei der Analyse der Anforderungen an die Verknüpfung von BIM und Simulation in der Fabrikplanung fällt auf, dass die Datenbedarfe der Simulation und BIM-Modellierung große Überschneidungen aufweisen. Hier ist zukünftig zu überprüfen, wie und welche zusätzlichen Anforderungen der Simulation zielgerichtet in BIM-Modellen abgebildet werden können. Weiterhin muss sichergestellt werden, dass die Möglichkeit besteht, diese Daten über standardisierte Schnittstellen bereitzustellen. Aktuelle

Bestrebungen der Autoren in der buildingSMART-Fachgruppe Open-BIM in der Fabrikplanung zielen darauf ab, den IFC-Parametersatz um entsprechende Produktionseigenschaften zu erweitern. Dabei sollen nach Möglichkeit auch simulationsrelevante Eigenschaften berücksichtigt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das IFC nur ein Format der Übertragung ist und nicht unmittelbar als Arbeitsmodell zu verstehen ist. Entsprechende Autorensoftware muss diese Erweiterung der Fähigkeiten konsequenterweise zeitnah mittragen. Dies steht in einer Linie mit der Forderung der Autoren einer Emanzipierung eines „FIM“ gegenüber dem klassischen, bauwerksbezogenen BIM, welche auch in die entsprechende Expertenempfehlung Einzug genommen hat [vgl. 24].

Weiterhin ist der offensichtliche Bruch der Durchgängigkeit bezüglich des Rückflusses der Simulationsergebnisse ein Problem: Bislang können Simulationsmodelle zwar (teil)automatisiert aufgebaut werden, jedoch müssen Anpassungen in der Auslegung der Fabrik noch händisch ausgewertet, übertragen und nachmodelliert werden. Auch hier besteht der Handlungsbedarf in einer standardisierten Schnittstelle, welche den Rückfluss darstellt. Ein pragmatischer erster Ansatz ist aus Sicht der Autoren zunächst die Nutzung der Aktualisierung der Betriebsmittelliste und darüber eine Anpassung des BIM-Modells. Dieser Workflow ist Stand der Technik bezüglich der strukturierten Anforderungsaufnahme (vgl. Bild 2) und könnte auf ausgeleitete Simulationsergebnisse angepasst werden.

Schlussendlich ist das Zusammenwirken von statischen und dynamischen Eigenschaften der Fabrikelemente zu adressieren. Dies wurde in Vorarbeiten der Autoren bereits konzeptionell untersucht [1, 9, 19]. Hier gilt es die Orchestrierung von Fabrik-BIM („FIM“ als Speicher statischer Informationen aller Fabrikelemente), Industrie 4.0 (Sensordaten und Systemzustände) und Digitaler Fabrik (Systemverhalten) mit dem Ziel eines Digitalen Fabrikzwilling voranzutreiben. Die Verknüpfung von BIM und Simulation ist dabei eine erste Teilmenge und bietet das Potenzial den Sprung zum ganzheitlichen Zwilling im Fabrikbetrieb durch die Integration von Industrie 4.0-Systemen (vgl. Bild 4) zu ermöglichen.

## 6 Fazit und Ausblick

Zusammenfassend ist die Verbindung von Fabrik-BIM und Simulation ein überfälliger Schritt, der eine – im Sinne der Daten-durchgängigkeit nach der Digitalen Fabrik – noch offene Lücke schließen würde. Im größeren Kontext ist diese Verbindung weiterhin ein Baustein für die Realisierung eines Digitalen Fabrikzwilling und steht in diesem Kontext auch in Beziehung zu neuen Technologien in der Fabrikplanung, wie etwa dem Industrial Metaverse. In diesem könnte die Koordination der Planungsergebnisse von Fabrik-BIM und Simulation erfolgen, jedoch sind hier bidirektionale Verbindungen (das heißt Rückführungen von Ergebnissen) erst noch zu untersuchen. Dabei könnte die Darstellung der Planungsinhalte im Kontext zueinander (im Sinne einer Überlagerung von Engineering-Tools) die Koordination in der Planung verbessern. Da die eigentliche Planungsleistung jedoch weiterhin in den Engineering-Tools selbst stattfindet, ist eine Rückführung von Ergebnissen anzustreben. Schließlich würde die gemeinsame Darstellung BIM und Simulation nur bedeuten, dass zwar koordiniert, aber nicht zwingend gemeinsam erarbeitet wird

– parallele Datenhaltung und Modelle würden aller Voraussicht nach trotzdem bestehen (vgl. Domänenbegriff, s.o.).

Hierbei ist analog der Einordnung eines Fabrik-BIM in den Gesamtplanungsprozess zu berücksichtigen: Der gestalterische Kern der Fabrikplanung (das heißt der kreative Prozess, Zusammenarbeit, Auslegung, etc.) findet nicht in BIM statt – sondern die Ergebnisse dieses Prozesses werden in BIM modelliert. Ebenso werden auch nicht alle Fabrikplanungsumfänge ins Metaverse verlagert werden können – obwohl es potentiell eine Verschiebung von Umfängen in diesen möglichen, gemeinsamen „Technologieträger“ geben wird.

Der pragmatische Ansatz sollte daher sein zu untersuchen, wie Simulationsmodelle unmittelbar vom BIM profitieren können. So könnte beispielsweise untersucht werden, wie Simulationsmodelle aus der Datenbasis schneller aufgebaut oder wie die Erkenntnisse über die Auslegung des Systems wieder in die statische Datenbasis in BIM-Modellen zurückgeführt werden können. In einem weiteren, ergänzenden Schritt ist die Anbindung von Industrie 4.0-Lösungen zu entwickeln. Grundlage für beides ist zunächst die für eine Simulation notwendigen Daten für ein erweitertes Fabrik-BIM zu definieren.

## LITERATUR

- [1] Schäfer, S. F.; Münnich, M.; Bermpohl, F. et al.: Aufbau des Digitalen Fabrikzwilling. Strukturierungshilfe für die Konzeptionierung. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 120 (2025) 5, *[in Veröffentlichung]*
- [2] Bermpohl, F.; Schäfer, S. F.; Hohmann, A. et al.: Short-cycled factory planning – motivation and existing challenges. Procedia CIRP 130 (2024), S. 1708–1713
- [3] Bermpohl, F.; Schäfer, S. F.; Neumann, O. et al.: Industrial Study on Holistic Digital Factory Models. Springer Production Engineering (2025)
- [4] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: 4499-1. Digitale Fabrik - Grundlagen. 2008-02
- [5] Milde, M.; Reinhart, G.: Automated Model Development and Parameterization of Material Flow Simulations. 2019 Winter Simulation Conference (WSC), National Harbor, MD, USA, 2019, S. 2166–2177
- [6] Feldmann, K.; Reinhart, G.: Simulationsbasierte Planungssysteme für Organisation und Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer 2000
- [7] Sutherland, R.: Studie zum Einsatz der ereignisdiskreten Simulation in Produktion und Logistik (Forschungsdaten), 2024
- [8] Mourtzis, D.: Simulation in the design and operation of manufacturing systems: state of the art and new trends. International Journal of Production Research 58 (2020) 7, S. 1927–1949
- [9] Schäfer, S. F.; Gorke, N. T.; Cevirgen, C. et al.: Elemente der „Fabrik der Zukunft“ Teil 2: Smart Plant – der Digitale Zwilling des Fabrikgesamt-systems. ZWF Zeitschrift fuer Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 117 (2022) 3, S. 151–156
- [10] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: 3633-1. Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen-Grundlagen. 2014-12
- [11] Eneyo, E. S.; Pannirselvam, G. P.: The use of simulation in facility layout design: a practical consulting experience. IEEE Winter Simulation Conference, Washington, DC, USA, 1998, S. 1527–1532
- [12] Munzke, A.; Neuhäuser, T.; Hohmann, A. et al.: Efficient Intralogistics Planning Based on an Innovative Intralogistics Tool using the Example of a Flexible Battery Cell Factory. Proceedings CPSI 2022 (2022)
- [13] Ott, D.; Voringer, B.; Bermpohl, F. et al.: Hybridisierung bestehender Montagesysteme. Simulationsgestütztes Vorgehen für eine Mischproduktion mit elektrischen Nutzfahrzeuge. wt Werkstatttechnik online 113 (2023) 03, S. 101–106
- [14] Gonnermann, C.; Kurscheid, S.; Schmucker, B. et al.: Simulation-based validation of process monitoring tasks in assembly. Springer Production Engineering (2024) 18, S. 721–731
- [15] Elshabshiri, A.; Ghanim, A.; Hussien, A. et al.: Integration of Building Information Modeling and Digital Twins in the Operation and Maintenance of a building lifecycle: A bibliometric analysis review. Journal of Building Engineering 99 (2025), S. 111541

- [16] Neuhäuser, T.; Spiegelsperger, S. M.; Hohmann, A. et al.: Relevanz von BIM in der Fabrikplanung/Building information modeling in factory planning – Results of an online survey. *wt Werkstatttechnik online* 113 (2023) 03, S. 93–100
- [17] Neuhäuser, T.; Zeiser, R.; Hieronymus, A. et al.: Kollaborative Fabrikplanung/Collaborative factory planning. *wt Werkstatttechnik online* 111 (2021) 03, S. 136–141
- [18] Neuhäuser, T.; Daub, R.: Building Information Modeling einführen. Die digitale Fabrik realisieren. *wt Werkstatttechnik online* 113 (2023) 04, S. 126–134
- [19] Rieke, L.; Schäfer, S. F.; Hingst, L. et al.: Einsatz von BIM in der Fabrikplanung. Weiterentwicklung durch der digitalen Fabrikplanung durch eine interdisziplinäre Planungsmethodik. *wt Werkstatttechnik online* 111 (2021) 11-12, 881-886
- [20] Schäfer, S. F.; Hingst, L.; Hook, J. et al.: Improving The Planning Quality Through Model-Based Factory Planning In BIM. *Journal of Production Systems and Logistics* (2022) 2
- [21] Neuhäuser, T.; Lenz, L. T.; Schäfer, S. F. et al.: Anwendung des LOC in der Fabrikplanung. *Bauingenieur* 98 (2023) 12, S. 421–433
- [22] König, A.: Entwicklung eines digitalen Fabrikgesamtmodells und dessen Integration in die Fabrikstrukturplanung eines Automobilherstellers. Dürren: Shaker 2013
- [23] Schäfer, S. F.; Lenz, L.; Neuhäuser, T.: Level of Coordination in der Fabrikplanung. Koordination der Fachdomänen Produktionssystem- und Bauplanung mit BIM. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 118 (2023) 5, S. 284–292
- [24] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: 2552 11.8. Building Information Modeling (BIM) - Informationsaustauschanforderungen Fabrikplanung. 2023-09
- [25] Bempohl, F.; Schäfer, S. F.; Forte, S.: Ganzheitliche digitale Fabrikmodelle. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 120 (2025) 3, S. 111–117
- [26] Schoch, O.; Russell, P.: Kanban as a Supporting Tool for the SUSTAINABLE Design and Operation of Smart Buildings The potential of the Toyota Production System in Architecture. CAADRIA 2008: Beyond Computer-Aided Design, Chiang Mai, Thailand, 2008, S. 68–74
- [27] Hermoso-Orzáez, M. J.; Carazo Alvarez, D.; Amezcua Ogáyar, J. M. et al.: The teaching innovation project: Project-Based Education with BIM Methodology within the Master's Degree in Industrial Engineering at UJAEN'. *PIMED* 34\_202123, 2023, pp. 2093–2105
- [28] Brioso, X.; Murgua, D.; Urbina, A.: Teaching Takt -Time, Flowline, and Point-to-point Precedence Relations: A Peruvian Case Study. *Procedia Engineering* 196 (2017), S. 666–673
- [29] Rihs, S.; Baud, B.; Makridou, R.: Transferring Data from a Factory Heritage Site into a Building Information Modeling (BIM) Which Integrates Sustainable Development Indicators. In: Liu, J.; Wang, L.; Wang, Y. et al. (Hrsg.): *Research on the Interface of Sustainable Plant Factory Based on Digital Twin*. Cham: Springer Nature Switzerland 2023, S. 270–280
- [30] Hamzaoui, M. A.; Julien, N.: A Generic Deployment Methodology for Digital Twins – First Building Blocks. In: Lyu, Z. (Hrsg.): *Handbook of Digital Twins*. Boca Raton: CRC Press 2024, S. 102–121
- [31] Liu, J.; Wang, L.; Wang, Y. et al. (Hrsg.): *Research on the Interface of Sustainable Plant Factory Based on Digital Twin*. Cham: Springer Nature Switzerland 2023
- [32] Correa, F. R.: BIM, Twin and Between: a Conceptual Engineering Approach to Formalize Digital Twins in Construction. 39th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 2022
- [33] Abreu Freire, A. L. de: Impacts of the inclusion of Virtual Reality in the Jeweler Manufacturing Process Based on the BIM Concept (Building Information Modeling). 2017 19th Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR), Curitiba, 2017, S. 195–199
- [34] Bin, X.; WeiLan, F.; Bo, J.: A BIM-aided visualization digital factory Framework. 2016 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC), Chengdu, China, 2016, S. 511–515
- [35] Jinsong, B.; Ying, Z.; Ziyue, X.: An Information Integrated Method and Its Application of Virtual Factory Using BIM. In: Luo, Y. (Hrsg.): *Cooperative Design, Visualization, and Engineering*. Cham: Springer International Publishing 2015, S. 115–123
- [36] Zhang, Y.; Wang, J.; Ahmad, R. et al.: Integrating lean production strategies, virtual reality technique and building information modeling method for mass customization in cabinet manufacturing. *Engineering, Construction and Architectural Management* 29 (2022) 10, S. 3970–3996
- [37] Salzano, A.; Miano, A.; Prota, A. et al.: The Use of the BIM Approach from the Conceptual Planning to the Construction Phase: The Case Study of the SHiP Experiment. *Designs* 6 (2022) 3, S. 48
- [38] Gao, D.; Peng, H.; Tao, X. et al.: Using a building information model for construction of a pharmaceutical project in Beijing, China. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering* 172 (2019) 3, S. 131–136
- [39] Cioni, C.; Di Sivo, M.; Ladián, D.: Use of BIM technology as a safety tool in the restoration phase of buildings: Case study of the façade of the "Royal Tobacco Factory" in Seville, Spain. *BIM 2019*, Seville, Spain, 2019, S. 291–303
- [40] Bortolini, R.; Shigaki, J. S.-I.; Formoso, C. T. et al.: Site Logistics Planning and Control Using 4d Modeling: A Study in a Lean Car Factory Building Site. 21th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (2015)
- [41] Gurevich, U.; Sacks, R.: Examination of the effects of a KanBIM production control system on subcontractors' task selections in interior works. *Automation in Construction* 37 (2014), S. 81–87
- [42] Kirchbach, K.; Steuer, D.; Gebhauer, F. et al.: Introduction of a Digital Earthwork Construction Site. 21th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (2013)
- [43] Chiu, C.-T.; Hsu, T.-H.; Wang, M.-T. et al.: Simulation for steel bridge erection by using BIM tools. *Proceedings of the 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC 2011* (2011)
- [44] Nerwal, N.; Abdelhamid, T. S.: Work structuring of construction crews: Installation of light fixtures case study. *Challenging Lean Construction Thinking: What Do We Think and What Do We Know? - 18th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, IGCL 18* (2010)
- [45] Barkokebas, B.; Khalife, S.; Al-Hussein, M. et al.: A BIM-lean framework for digitalisation of premanufacturing phases in offsite construction. *Engineering, Construction and Architectural Management* 28 (2021) 8, S. 2155–2175
- [46] He, R.; Li, M.; Gan, V. J. et al.: BIM-enabled computerized design and digital fabrication of industrialized buildings: A case study. *Journal of Cleaner Production* 278 (2021), S. 123505
- [47] Xu, Z.; Wang, X.; Rao, Z.: Automated Optimization for the Production Scheduling of Prefabricated Elements Based on the Genetic Algorithm and IFC Object Segmentation. *Processes* 8 (2020) 12, S. 1593
- [48] Martinez, P.; Ahmad, R.; Al-Hussein, M.: A vision-based system for pre-inspection of steel frame manufacturing. *Automation in Construction* 97 (2019), S. 151–163
- [49] Gan, S. Q.; Zhang, H.: Application of Virtual Construction Technology in Green Construction. *Applied Mechanics and Materials* 368–370 (2013), S. 1139–1142
- [50] Lee, J.; Kim, J.: BIM-Based 4D Simulation to Improve Module Manufacturing Productivity for Sustainable Building Projects. *Sustainability* 9 (2017) 3, S. 426
- [51] Ariño, J.; Gómez, C.; Murga, G. et al.: Managing the system validation of the DKIST enclosure. SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, Montréal, Quebec, Canada, 2014, 91501A
- [52] Moghadam, M.; Alwisy, A.; Al-Hussein, M.: Integrated BIM/Lean Base Production Line Schedule Model for Modular Construction Manufacturing. *Construction Research Congress 2012*, West Lafayette, Indiana, United States, 2012, S. 1271–1280
- [53] Abbasi, S.; Noorzai, E.: The BIM-Based multi-optimization approach in order to determine the trade-off between embodied and operation energy focused on renewable energy use. *Journal of Cleaner Production* 281 (2021), S. 125359
- [54] Garwood, T. L.; Hughes, B. R.; Oates, M. R. et al.: A review of energy simulation tools for the manufacturing sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81 (2018), S. 895–911
- [55] Gourlis, G.; Kovacic, I.: Building Information Modelling for analysis of energy efficient industrial buildings – A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68 (2017), S. 953–963
- [56] Hsu, H.-C.; Wu, I.-C.: Employing Simulated Annealing Algorithms to Automatically Resolve MEP Clashes in Building Information Modeling Models. 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Banff, AB, Canada, 2019
- [57] TU Xian, YANG Jianping: Exploration and application of security management mode based on "grid & matrix". *China Safety Science Journal* 33 (2023) S1, S. 7
- [58] Le, H. T. and Nguyen, T. T.: Building performance optimisation using CFD for 6D BIM applications: a case study. In: The 1st International Conference on Innovations for Computing, Engineering and Materials (ICEM), 2021, Ho Chi Minh City, Vietnam, 2021, pp. 20003.
- [59] Neuhäuser, T.; Dimyadi, J.; Eckart, C. J. et al.: Systematic integration of building information and simulation models for the automated evaluation of factory layout variants. 2023 European Conference on Computing in Construction and the 40th International CIB W78 Conference, 2023

- [60] Süße, M.; Munnich, M.; Lenz, L. et al.: Data requirements for factory layout planning and simulation – Setting up a module-based concept for information delivery manuals. 2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Stuttgart, Germany, 2022, S. 1–4
- [61] Krüger, T.: Entwicklung einer Gesamtmethodik zur Kombination von mathematischer Anordnungsoptimierung und Materialflussimulation für die Produktionslayoutplanung. Dürren: Shaker 2019

---

**Dr.-Ing. Simon F. Schäfer** 

*simon.schaefer@ingenics.com*  
Tel. +49 151 46756203

**Bernd Buning, M.Sc.**

**Dr.-Ing. Thomas Krüger**

Ingenics Consulting  
Lessingstr. 70, 38440 Wolfsburg  
[www.ingenics.com](http://www.ingenics.com)

**Fabian Bermpohl, M.Sc.** 

*fabian.bermpohl@igcv.fraunhofer.de*  
Tel. +49 821 90678-145

Fraunhofer-Institut für Gießerei-,  
Composite-, und Verarbeitungstechnik IGCV  
Am Technologiezentrum 10, 86159 Augsburg  
[www.igcv.fraunhofer.de](http://www.igcv.fraunhofer.de)

**Marc Münnich, M.Sc.** 

*marc.muennich@iwu.fraunhofer.de*  
Tel. +49 371 5397-1771

Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen  
und Umformtechnik IWU  
Reichenhainer Str. 88, 09126 Chemnitz  
[www.iwu.fraunhofer.de](http://www.iwu.fraunhofer.de)

**LIZENZ**



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons  
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)