

E Innovationen im Mauerwerksbau

**E 1 Digitale Transformation im Bauwesen –
von der Theorie zur Anwendung**

Mathias Obergrießer und Michael A. Kraus

Mauerwerk-Kalender 2022: Fassadengestaltung, Bauphysik, Innovationen.

Herausgegeben von Detleff Schermer und Eric Brehm.

© 2022 Ernst & Sohn GmbH & Co. KG. Published 2022 by Ernst & Sohn GmbH & Co. KG.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung 501	3	Stand der digitalen Transformation in der Anwendung 513
1.1	Aktueller Stand der Digitalisierung 501	3.1	Wie weit sind Akzeptanz und Implementierung der Methode BIM in der Praxis? 513
1.2	Gründe und Potenziale für die Digitalisierung 501	3.2	Welche Awf lassen sich mit dem aktuellen Wissen wirtschaftlich umsetzen? 513
2	Theoretische Aspekte der digitalen Transformation 502	3.3	Der Weg zur breiten Adaption von digitalen Werkzeugen und interdisziplinärer Zusammenarbeit 515
2.1	Der Weg vom analogen Planen und Bauen zur Vision Planen/Bauen 4.0 502	4	Fazit und Ausblick 517
2.2	Einblick in verschiedene Digitalisierungsstrategien im Bauwesen/Wohnungsbau etc. 504	5	Literatur 518
2.2.1	Vorhandene Methoden und digitale Werkzeuge 504		
2.2.2	Common Data Environment (CDE) und BIM-Anwendungsfälle 506		
2.2.3	Nutzung kollaborativer Prozesslandschaft im Bauwesen 508		
2.2.4	Robotik und KI als Wegbereiter zum seriellen Bauen 508		

1 Einleitung

1.1 Aktueller Stand der Digitalisierung

Nach *Henry Ford* besteht Erfolg darin, dass man genau die Fähigkeiten hat, welche im Moment gefragt sind. Diese Aussage gibt Grund zum Nachdenken und lässt sich auf viele Bereiche des Lebens übertragen, selbst auf die Digitalisierung im Bausektor. Um nun den aktuellen Erfolg der Digitalisierung in der Baubranche erkennen und einschätzen zu können, sollten folgenden Punkte genauer betrachtet werden: Wie viele und welche Digitalisierungsstrategien werden aktuell benötigt, welche Techniken stehen hierfür zur Verfügung und welche Fähigkeiten müssen diese Techniken, aber auch der darin involvierte Mensch besitzen, um eine praxiserrechte und wirtschaftlich tragbare digitale Transformation der Baubranche durchführen zu können (vgl. Bild 1).

1.2 Gründe und Potenziale für die Digitalisierung

Derzeit erleben wir die Auswirkungen, Einschränkungen und Folgen einer Pandemie, die den Fokus auf künftige Formen des sozialen Miteinanders, des Wirtschaftens und des Umgangs mit Ressourcen lenken und noch stärker in den Fokus der Gesellschaft stellen wird. Die damit einhergehende Verknappung von Bauprodukten wirft zudem die Frage auf, inwiefern die digitale Transformation des Bauwesens als ein möglicher Lösungsansatz für agileres und situationsbedingtes Planen und Bauen betrachtet werden kann. Stand heute befinden wir uns bereits seit einigen Jahren mitten in der Digitalisierung der Baubranche, die aktuell eine sehr zentrale Rolle in der Branche eingenommen hat. Hierzu wurde und wird eine Vielzahl an verschiedensten Strategien erprobt, neu entwickelt und in den unterschiedlichsten Bereichen der Branche eingeführt. Vor allem in der Phase zur Planung der Bauwerke existiert geradezu eine Vielzahl an digitalen Lö-

sungen, die beispielsweise eine integrierte Planung unterstützen, eine zentrale Haltung der Daten vorsehen oder eine durchgängige und konsistente Planungsphilosophie ermöglichen [1]. Informationen werden dabei nicht nur mehr auf Plänen oder Dokumenten abgesetzt, vielmehr werden sämtliche geometrischen und alphanumerischen Informationen des Bauwerks in einer Art visuellen Datenbank – dem 3D-Modell – abgelegt. Dabei spielt das 3D-Modell eine zentrale Rolle, da dieses die visuelle Kommunikationsplattform für den Menschen darstellt. Komplexe Datenstrukturen inklusive aller Bauteil- und Prozessabhängigkeiten, die während des Lebenszyklus eines Bauwerks auftreten, lassen sich erst dadurch konsistent und verständlich für den Menschen abbilden. Erst durch die datenbankorientierte Sichtweise, Verwaltung und Nutzung der lebenszyklusorientierten Informationen eines Bauwerks ist eine erfolgreiche Wandlung der Branche in eine digital verknüpfte und silofreie Bauwelt greifbar nahe.

Ziel kann und darf es aber nicht sein, die Daten nur zu sammeln, sondern diese auch zu nutzen. Aus diesem Grund stellt die aktuelle Digitalisierungsform nur einen Zwischenschritt zur nächsten Stufe der Digitalisierung dar, in der die Daten dazu genutzt werden, um die Baubranche noch effektiver, ressourcenschonender und nachhaltiger ausgestalten zu können. Eine Form dieser digitalen Transformation ist zum Beispiel der Einsatz von künstlicher Intelligenz (KI) mit der mittelfristig fast jede Person und jedes Unternehmen in Kontakt kommen wird. Die Frage ist also nicht wann, sondern wie die digitale Transformation erfolgreich und gewinnbringend in die Praxis, Forschung und Lehre implementiert werden kann.

Grundsätzlich verspricht die digitale Transformation eine Vielzahl an Potenzialen, die über die aktuell in der Praxis ankommende Methode des Building Information Model (BIM) bis hin zum künftigen Einsatz von KI und/oder (teil)autonomen Fahr- und Produktionssystemen als signifikante Verschiebung und Reduk-



Bild 1. Vision der digitalen Transformation im Bauwesen – Fähigkeiten, Technologien und vernetzte Wertschöpfungsstrategien anhand eines digitalen Zwillings

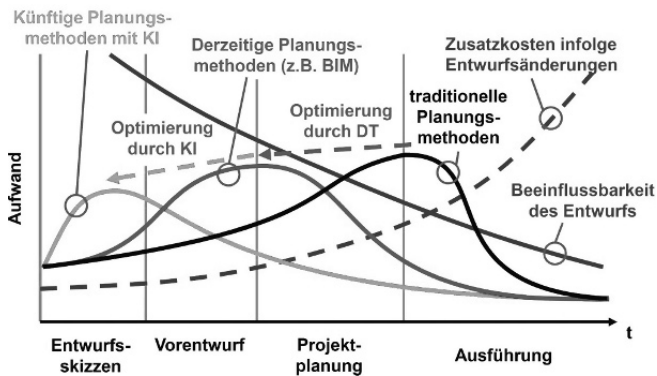


Bild 2. Effekte von BIM und KI auf die Verschiebung des Planungsaufwands gegenüber dem Status quo in verschiedenen Bauprojektphasen (aus [2])

tion des Planungs- und Herstellungsaufwands gegenüber dem aktuellen Status quo verläuft. Somit ergeben sich Kosteneinsparungen bei gleichzeitiger Steigerung der Effizienz und Entscheidungssicherheit durch die Berücksichtigung und Analyse der gesammelten Bauwerks- und Prozessdaten (vgl. Bild 2).

Im Zuge der Digitalisierung der Baubranche ist aber auch die Erkenntnis, dass digitale Systeme und insbesondere die KI auch in Zukunft nicht alle Arbeiten und Berufsbilder automatisieren sowie keine Entscheidungen automatisiert-datengestützt treffen werden, von großer Bedeutung. Mittelfristig wird sich hingegen deutlich abzeichnen, dass durch die Entwicklung und Etablierung sog. KI-Mensch-Interaktionssysteme signifikante technische und wirtschaftliche Vorteile gegenüber dem Status quo erzielt werden und somit der Mensch als finaler Entscheidungsträger weiterhin im Fokus und in der Verantwortung bleibt. Die Pareto-optimale Natur vieler technischer Probleme bedingt eine finale Entscheidung einer menschlichen Person mit Fachwissen, unabhängig davon, wie viele Daten zu einem Problem vorhanden, wie ausgeklügelt die KI-Algorithmen oder automatisiert vorhandene Prozesse sind. Auch in den nächsten beiden Dekaden wird die Technik den Menschen unterstützen und nicht umgekehrt.

Leider ist dieser technische, aber auch menschliche Wandel nicht einfach zu realisieren und muss aktuell eine Vielzahl an Hürden zur erfolgreichen Implementierung in die Praxis nehmen. Insbesondere die Kopplung der Modelldaten aus der Planungsphase in die Umsetzungsphase und wieder zurück stellt die Baubranche täglich vor große Herausforderungen.

2 Theoretische Aspekte der digitalen Transformation

2.1 Der Weg vom analogen Planen und Bauen zur Vision Planen/Bauen 4.0

Zum Einstieg in das komplexe Themengebiet der digitalen Transformation soll zunächst ein kurzer Überblick über die Entwicklung der Vision der digitalen

Transformation „Planen und Bauen 4.0“ gegeben werden. Dieser Abschnitt dient zur Verdeutlichung, woher wir kommen, wohin wir gehen und zum besseren Verständnis und der Nachvollziehbarkeit des aktuellen Entwicklungsprozesses und dessen aktueller Entwicklungsgeschwindigkeit im Sinne einer Art Technologiefolgenabschätzung.

Seit Beginn der Menschheit plant, baut und betreibt der Mensch Bauwerke. Zuerst nutzte er die von der Natur geschaffenen Höhlen, dann baute er mobile Zelte in Form einer Art historischen Baukastensystems. Anschließend wurde er sesshaft, was zur Folge hatte, dass seine Bauwerke massiver wurden, um einen längeren Betriebslebenszyklus des Bauwerks sicherstellen zu können. Oberflächlich betrachtet befindet er sich in dieser Phase immer noch, wobei sich die Größe, der Komfort, die Komplexität, der Anspruch oder die Vielfalt der Bauwerke über die Jahre verändert haben. Mittlerweile gibt es Bauwerke, die mobil verlagert werden können und solche, die digital vernetzt sind (Smart Building) oder Bauwerke, die bis fast 1000 m in den Himmel ragen. Alle diese Besonderheiten sind eine Errungenschaft des technischen Fortschritts und der damit einhergehenden Technologien [3].

In Bild 3 sind hierzu die verschiedenen Evolutionsstufen vom ursprünglichen Planen und Bauen in der Antike bis hin zum automatisierten und industrialisierten Planen und Bauen – im Sinne eines Planen und Bauen 4.0 als Pendant zu Industrie 4.0 – dargestellt. Dabei gilt es hervorzuheben, dass sich über die gesamten Entwicklungsstufen hinweg der Prozess zur Umsetzung eines Bauprojekts von Grund auf nicht verändert hat. Nach wie vor gelten die generellen Prozessbausteine Entwerfen und Planen eines Bauwerks, Vorbereitungen zur Umsetzung eines Bauwerks, Errichtung und Betrieb des Bauwerks bis hin zum Rückbau bzw. Umbau des Bauwerks. Verändert hat sich über die Jahre nur die Art und Weise mit welcher Technik geplant und gebaut wird.

In der Planung manifestiert sich dies durch den Wechsel vom Gedankenmodell im Kopf und der mündlichen Informationsübermittlung auf der Baustelle hin zur Abbildung und Kommunikation der Bauwerksdaten auf dem Papier, die mithilfe von Stift, Lineal

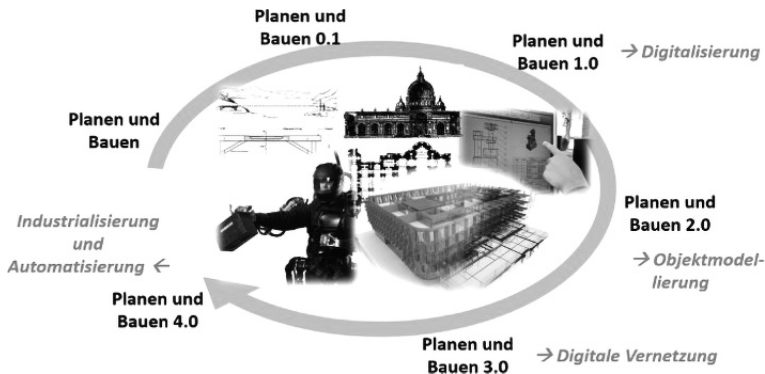


Bild 3. Historische Entwicklung Planen und Bauen 4.0

und Zirkel erzeugt wurden. Dieser papierbasierte Planungsprozess wurde industrialisiert, indem Zeichenbretter und Rapidographen zur Anwendung kamen. Der Wechsel von dieser analogen Welt in die digitale Welt erfolgte durch die Einführung digitaler Werkzeuge, wie zum Beispiel 2D-CAD-Systeme, die aktuell durch eine vernetzte und modellbasierte Arbeitsweise revolutioniert werden. Dabei erfolgt die Planung eines Bauwerks anhand eines datenbankorientierten und mit vielen alphanumerischen und geometrischen Informationen angereicherten dreidimensionalen Bauwerksinformationsmodells – kurz BIM.

Zukünftig soll auf Basis dieser strukturierten, koordinierten und modellorientierten Informationsverwaltungsplattform – dem BIM-Modell – beispielsweise die Steuerung der Fertigungsmaschinen in der Baufabrik oder die Steuerung der Maschinen auf der Baustelle zur (teil)automatisierten Herstellung einzelner Bauteile oder ganzer Bauwerke erfolgen. Eine hohe Ausnutzung der Wertschöpfungskette der einmal digital generierten Daten ist die Folge.

Für die Bauumsetzung lässt sich ein analoges Schema ableiten. Zu Beginn wurden die Bauteile händisch und ohne technische Hilfsmittel hergestellt. Heutzutage gibt es ein reiches Set an „Helferlein“ auf der Baustelle bzw. im Werk, die die Umsetzung der Bauaufgabe enorm erleichtern. Angefangen von der Betonmischmaschine bis hin zur hochleistungsfähigen CNC-Fräsanlage oder modernsten Vermessungsgeräten wie zum Beispiel Laserscanner oder Coptersysteme. Dabei erfolgt die Realisierung des Bauwerks entweder traditionell auf Basis von Plandaten oder direkt durch eine integrierte Übergabe der digitalen Bauwerks- bzw. Bauteilinformationen an die Fertigungs- bzw. Baumaschinen oder Vermessungsgeräte. Die Herstellung des Bauteils bleibt aber im Grundsatz gleich, nur die Art und Weise, wie es hergestellt wird, hat sich durch den Einsatz neuer Technologien verändert.

Hieraus kann nun der Rückschluss gezogen werden, dass während unserer gesamten Baugeschichte eine kontinuierliche Modernisierung unsere Bautätigkeit, egal ob beim Planen oder beim Bauen, stattgefunden hat. Die Art und der Umfang des Modernisierungsle-

vels orientiert sich dabei einerseits an dem aktuellen Baubedarf und der Komplexität der zu errichtenden und betreibenden Bauwerke. Andererseits stellen aber auch die vorhandenen Ressourcen zur Umsetzung der Bauaufgabe oder die aktuell zur Verfügung stehenden technologischen Möglichkeiten weitere wichtige Faktoren dar. Die digitale Transformation ist somit das Resultat unserer bisherigen Innovationen und der nächste Schritt in die evolutionäre Zukunft.

Es gilt aber auch festzuhalten, dass die Digitalisierungs-offensive nicht nur das Ergebnis unseres bisherigen Schaffens ist. Es resultiert auch aus der Erkenntnis, dass gewisse wiederkehrende Muster während der Planung, der Umsetzung und des Betriebs eines Bauwerks auftreten. Erst nach Erlangen dieser Erkenntnis war es möglich, eine wirtschaftliche Implementierung von Digitalisierungsansätzen und -strategien und den daraus resultierenden digitalen Werkzeugen durchzuführen. Standards stellen dabei eine essenzielle Grundlage zur Digitalisierung eines Prozesses dar.

Dies bedeutet aber nicht, dass sich standardisierte Abläufe und kreatives, flexibles Schaffen gegenseitig ausschließen! Eher gilt der Grundsatz, Standards und Kreativität in Einklang zu bringen, indem interdisziplinäre, integrierte und digital vernetzte Strategien entwickelt werden, die beiden Ansprüchen entsprechen können. Dabei geht es vornehmlich nicht nur um die Entwicklung von digitalen Werkzeugen, sondern um die Schärfung des Bewusstseins, wie zukünftig geplant und gebaut wird. Nicht isoliert als Insel, sondern als kollaboratives, fächerübergreifendes und partnerschaftliches Team. Am besten über alle Lebenszyklusphasen eines Bauwerks hinweg, was eine große Herausforderung in der Architektur- und Baubranche darstellt.

Dabei gilt es, das Merkmal, dass die Digitalisierung als ein Querschnittsthema einzustufen ist, stets in Erinnerung zu rufen. Insbesondere dann, wenn die einzelnen Projektphasen und die hierzu erforderlichen Prozessbausteine nur für sich allein als Insel betrachtet werden – zwar digital, aber nicht vernetzt. Diese Isolation führt trotz der Digitalisierungsanstrengungen und -investitionen häufig dazu, dass die Digitalisierung eines Ablaufs keine Minderung des Workloads, sondern

eher einen deutlichen Anstieg des Workloads hervorruft. Ein wirtschaftlich negatives Ergebnis kann die Folge sein.

Aktuell ist dieser Effekt in der aufwendigen Attributierung und geometrischen Detaillierung der 3D-Bauwerksmodelle in der Planungsphase erkennbar, da der Nutzen der Daten erst in einer späteren Lebenszyklusphase, wie z. B. der Bauausführung oder des Betriebs, eintritt! Planer können häufig keinen Mehrwert daraus erkennen bzw. generieren. Diesen Effekt nutzen Skeptiker der Digitalisierung gern, um den mangelhaften wirtschaftlichen Mehrwert der Digitalisierung belegen zu können (vgl. Bild 9a). Die Betrachtung des wirtschaftlichen und ressourcen-technischen Potenzials, die sich aus der Digitalisierung über den gesamten Lebenszyklus ergibt, bleibt dabei oftmals außen vor.

Zur Lösung dieses Problems gilt es daher drei Punkte zu beachten. Erstens, die Entwicklung von digitalen Werkzeugen, die es ermöglichen, den höheren Workload, der sich aus der Digitalisierung ergibt, zu kompensieren. Zweitens, die digitale Vernetzung der einzelnen am Projekt beteiligten Personen, Organisationen und Technologien durch die Förderung und Umsetzung einer interdisziplinären und kollaborativen Denk- und Arbeitsweise zu steigern. Drittens, die Entwicklung bzw. die Anwendung praktikabler Digitalisierungsstrategien im Projekt oder im Unternehmen umzusetzen, indem effektive Prozessabläufe durch die Analyse und Visualisierung der bestehenden Prozesslandschaft herausgearbeitet werden.

2.2 Einblick in verschiedene Digitalisierungsstrategien im Bauwesen/Wohnungsbau etc.

2.2.1 Vorhandene Methoden und digitale Werkzeuge

Unter dem Schlagwort der „digitalen Transformation“ wird ein großes Portfolio an Methoden, Technologien und Kollaborationsstrategien verstanden. Wie bereits eingangs erwähnt, ist eine der am Bau bekanntesten Digitalisierungsmethode die Methode des Building Information Model (BIM). Kurz gesagt hat BIM als Ziel, alle geometrischen und alphanumerischen Informationen, die während des Lebenszyklus eines Bauwerks entstehen, anhand eines zentral verwalteten und digitalen Bauwerksinformationsmodells, dem sogenannten digitalen Zwilling, abzubilden. Momentan existieren mehrere Definitionen eines digitalen Zwillings, deren Inhalte sich je nach Disziplin mehr oder weniger stark unterscheiden. Allen Definitionen gemein ist die Quintessenz, dass ein digitaler Zwilling ein digitales Replikat eines physisch gebauten Objekts darstellt, welches eine Verbindung zum physischen Zwilling besitzt [4–10]. Mit diesem Ansatz kann eine dynamische virtuelle Darstellung über den gesamten Lebenszyklus hinweg garantiert werden. Zudem erlaubt die Verwendung von (Echtzeit-)Daten ein Verständnis,

Lernen, Nachsteuern und dynamisches Neukalibrieren des digitalen Zwillings zu beliebigen Zeitpunkten. Durch Analysen mithilfe des digitalen Zwillings stehen weiterhin probabilistische Simulationen zur Systemoptimierung und verbesserten Entscheidungsfindung zur Verfügung. Derzeit werden digitale Zwillinge in verschiedenen Industriebereichen eingesetzt, um Planung, Betrieb und Wartung von physischen Assets bzw. Anlagen, Systemen und Herstellungsprozessen zu optimieren. Dabei können physische Objekte virtuell leben und mit anderen Objekten, Maschinen und Personen interagieren.

Im Gegensatz zum digitalen Zwilling grenzen sich die Begriffe des digitalen Modells (z. B. ein BIM-Modell, vgl. Bild 4, links) sowie des digitalen Schattens (Bild 4, Mitte) mit keiner bzw. unidirektionaler Verbindung zum physischen Zwilling ab.

Für die physischen und digitalen Zwillinge selbst kann ein Lebenszyklus definiert werden, welcher synchron zur PLM- bzw. Lebenszyklusphase eingeteilt wird. Insbesondere ist die BIM-Technologie von derjenigen der Zwillinge eingeschlossen. Die nahtlose Übertragung von Daten und Informationen ist durch die Synchronisierung von physischer und virtueller Welt sichergestellt, sodass die virtuelle Einheit die Lebensdauer ihres entsprechenden physischen Systems widerspiegelt und Entscheidungsinformationen an die reale Welt zurücksenden kann. Zwischen dem digitalen und dem realen Zwilling werden drei Arten von Informationen ausgetauscht: faktische/physische, anleitende sowie semantische [12].

Es ist zu beobachten, dass die derzeitige akademische und populärwissenschaftliche Literaturlage im Bauwesen häufig nicht scharf zwischen den Begriffen des digitalen Zwillings und BIM abgrenzt, vielmehr werden beide Begriffe häufig synonym verwendet. Ein wesentliches Merkmal eines digitalen Zwillings ist aber die Interaktion mit dem physischen Zwilling, sodass an dieser Stelle in Übereinstimmung mit [7, 13, 15, 16] betont werden soll, dass eine Gleichheit von BIM und digitalem Zwilling nicht per se gegeben ist. Digitale Zwillinge werden heutzutage im Bauwesen hauptsächlich in der Betriebs- und Instandhaltungsphase [10, 16] eingesetzt. Insbesondere hat sich u. a. bei öffentlichen und privaten Auftraggebern aber die Erkenntnis eingestellt, dass die Informationen aus den BIM-Modellen von baulichen Anlagen einen über den baulichen Wert der Anlage hinausgehenden Wert besitzen. Diese bilden den digitalen Ausgangspunkt mehrskaliger Informationssysteme, zum optimalen Betrieb einzelner Anlagen auf der Mesoskala und sogar ganzer Anlagensysteme auf der Makroskala. Der Lebenszyklus von BIM-Modellen, wo neben dem as-built (gebauten Zustand) auch die Zustände as-planned (planmäßig) und as-designed (wie entworfen) sowie as-performed (ausgeführt) zu berücksichtigen sind, erzwingt ein lebenszyklusbegleitendes Update [13, 16] und ermöglicht die synonyme Betrachtung von BIM-Modellen als eine Art digitalen Zwilling.

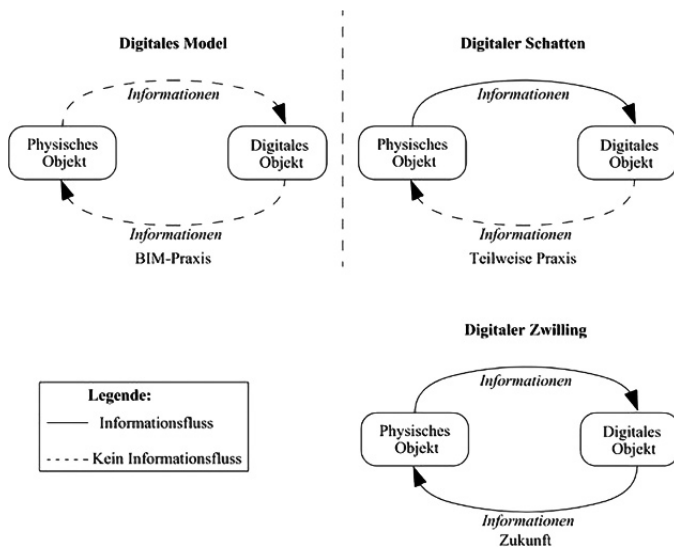


Bild 4. Veranschaulichung der Begriffe des digitalen Modells, eines digitalen Schattens und eines digitalen Zwillings (aus [11])

Durch die Einführung eines zentral verwalteten und lebenszyklusorientierten BIM-Modells/digitalen Zwillings ist nun die multiple Nutzung der einmal im digitalen Informationsmodell hinterlegten Bauwerksdaten möglich, was sich in einer Minimierung der Informationsverluste und einer Steigerung der Informationsqualität widerspiegelt. Die Methode BIM dient im Sinne eines Bauwerksinformationsmodellierungsprozesses aber nicht nur dazu, Daten anhand eines virtuellen Abbilds/digitalen Zwillings zu sammeln, sondern ermöglicht es auch, eine koordinierte Verteilung der Informationen und die Steuerung der Prozesse zur Planung, Umsetzung, zum Betrieb und Rückbau eines Bauwerks zu managen. Der Reifegrad des virtuellen, aber auch des realen Bauwerks dient dabei als Indikator für die Ableitung und Koordination der verschiedenen Informationsstufen sowie Prozessphasen und Prozessbausteine. BIM lässt sich somit als eine digital vernetzte und kooperative Arbeitsmethode auf Basis eines digitalen Zwillings auffassen, mit dessen Hilfe sich die notwendigen Lebenszyklusprozesse eines Bauwerks umsetzen lassen. Digitale Werkzeuge unterstützen dabei diesen komplexen Vorgang.

Durch den Einsatz digitaler Werkzeuge und die Anwendung eines modellbasierten Ansatzes ist es nun mithilfe von BIM möglich, den Prozess zur Planung eines Bauwerks in eine frühere Leistungsphase zu verlagern (vgl. Bild 2). Dies führt zu dem positiven Effekt, dass die Kosten zur Planung und zur Umsetzung eines Bauwerks aufgrund der höheren Informationstiefe zu einem früheren Zeitpunkt besser bewertet und beeinflusst werden können. Diese Verlagerung führt aber nach [17] auch zu dem Nebeneffekt, dass zu einem früheren Zeitpunkt die erforderlichen Bauwerksinformationen zur Planung und Umsetzung des Bauwerks definiert werden bzw. vorgehalten werden müssen (vgl. Bild 5a). Oftmals existieren diese Informatio-

nen noch nicht oder benötigen noch eine Abstimmung mit den verschiedenen Prozessbeteiligten, die zu diesem Zeitpunkt aufgrund der klassischen leistungphasen-orientierten Vergabeform teilweise noch nicht feststehen (z. B. Baufirma, Betreiber etc.). Selbst der Bauherr kann oftmals keine ausreichende Informationstiefe liefern, da er sich zu diesem frühen Zeitpunkt noch keine Gedanken über die Details gemacht hat (welche Fliesen, welche Putzstruktur, wo liegen die Lampen und Steckdosen, welche Heizung etc.).

Aktuell wird dieses Problem in der Praxis gelöst, indem vorgefertigte digitale Bauteil-Bibliotheken (Assistenten, Familien, Favoriten etc.) eingesetzt werden, die mit einer Vielzahl von Attributen und geometrischen Informationen ausgestattet sind. Die Entwicklung derartiger digitaler Werkzeuge stellt einen der zentralen Schlüssel zur erfolgreichen Implementierung der Methode BIM in der Planungspraxis dar. Leider existieren derartige Tools noch viel zu wenig am Markt, wie aus Bild 5b ersichtlich ist [18]. Aus diesem Grund ist in vielen Bereichen des Bauwesens, wie z. B. zur Modellgenerierung, zur Modelldatennutzung und -auswertung, aber auch zur Pflege der Modelldaten oder zur Rückkopplung der Bauwerksdaten ins Modell, noch eine Vielzahl an software-spezifischen Entwicklungsarbeiten zu leisten.

Zusammenfassend kann somit festgestellt werden, dass derzeit neben den technischen Schwierigkeiten auch theoretisch-fachwissenschaftliche Fragen zu BIM und digitalen Zwillingen offenbleiben. Ein wirtschaftlicher Einsatz der BIM-Methode in der täglichen Praxis zum Beispiel zur Erzeugung eines digitalen Zwillings ist derzeit nicht ohne Weiteres möglich, stellt aber einen vielversprechenden Ansatzpunkt dar.

Es gilt aber auch festzuhalten, dass die Anwendung der Methode BIM allein noch keine vollständige Digitalisierung der Baubranche darstellt. Weitere agile Metho-

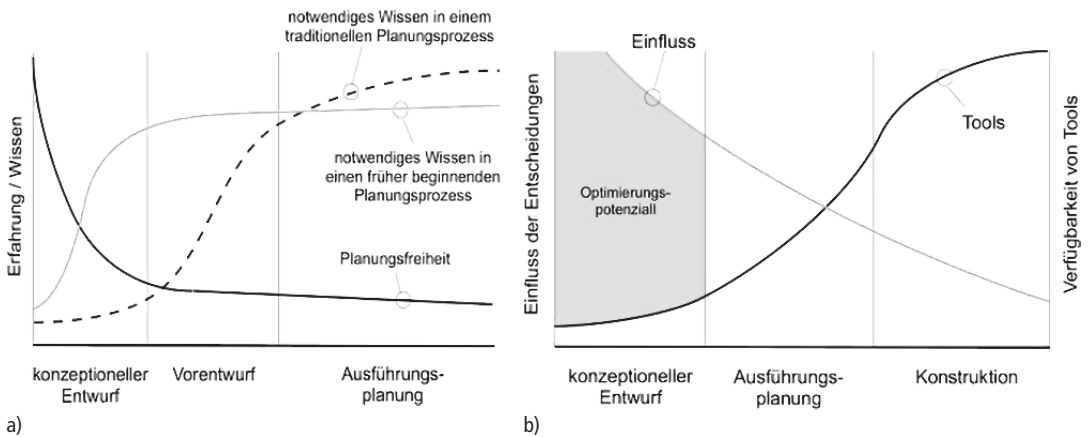


Bild 5. Nebeneffekt bei der Anwendung von BIM a) auf das erforderliche Knowhow (nach [17]) und b) auf die Technologie (nach [18])

den wie Lean Management, Last Planner oder Scrum, aber auch Automatisierungsstrategien, die den Einsatz von robotergestützten Linienproduktionen bzw. digital vernetzter Baumaschinensteuerung bis hin zu autonom fahrenden Baugeräten oder der Nutzung von KI vorsehen, sind notwendige Komponenten, um eine vollständige und effiziente Digitalisierung der Baubranche umsetzen zu können. Selbst die Anwendung neuer modularer, serieller Bauweisen gilt es zu prüfen.

2.2.2 Common Data Environment (CDE) und BIM-Anwendungsfälle

Wie in den vorangegangenen Abschnitten erwähnt, stellt die Umsetzung eines BIM-Modells keine triviale Aufgabenstellung dar. Besonders, da der Anspruch vorherrscht, sämtliche Daten des Bauwerks, die über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks entstehen, anhand eines zentralen Datenmodells strukturiert und bauteilorientiert vorzuhalten und verwalten zu wollen [1]. Eine echtzeit-orientierte Nutzung der Bauwerksdaten innerhalb einer digital strukturierten Umgebung, die z. B. eine Versionierung und Verwaltung der Bauwerksinformationen automatisch vornimmt oder ein synchrones Arbeiten an einem Bauteil erlaubt, ist das primäre Ziel. In der Softwarelandschaft werden diese Plattformen als Common Data Environment (CDE) bezeichnet. Leider konnten sich am derzeitigen Markt noch keine CDE-Systeme in der Praxis etablieren, da zum einen die komplexe und stark fragmentierte Prozess- und Datenstruktur bei gleichzeitig ständigem Wechsel der Projektbeteiligten eine große Hürde darstellt. Ständig müssen die Fragen geklärt werden: Wer besitzt und betreibt die Plattform?, Wem gehören die Daten?, Wer hat welche Rechte? u. v. m. Zum anderen stellt die Vision, sämtliche Daten und Abläufe anhand eines zentralen Datenmodells zu steuern, höchste Ansprüche an die Technologie. Es

existieren zwar erste Ansätze in der Forschung, wie eine zeitgleiche Nutzung der Modelldaten von mehreren Nutzern möglich ist [19], für den täglichen Einsatz in der Praxis sind diese aber noch zu unausgereift. Daher wurde die komplexe Vision eines zentral verwalteten und synchron genutzten Datenmodells in ingenieurmäßiger Manier vereinfacht, indem das Bauwerksmodell analog zu den Fachdisziplinen aus der Bauplanung und Bauumsetzung in kleinere Fachmodelle wie zum Beispiel Architekturmodell, Tragwerks- und technische Gebäudeausrüstungsmodelle oder andere Simulationsmodelle unterteilt (vgl. Bild 6).

Dadurch konnte die sehr komplexe Datenstruktur eines zentralen Modells auf eine Vielzahl an kleineren Datenstrukturen reduziert und in eine prozessorientierte sowie parallel nutzbare Informationsverwaltungsstrategie transformiert werden. Häufig werden in der Praxis diese BIM-Fachmodelle auch als BIM-Anwendungsfälle bezeichnet, da das Fachmodell letztendlich das visuelle Resultat der Arbeitstätigkeit aus der BIM-Anwendung darstellt. Ein weiterer Nebeneffekt dieser Unterteilung ist, dass die seit jeher bekannten Arbeitsstrukturen zum Planen, Bauen und Betreiben eines Bauwerks nicht stark verändert werden, was sich in einer größeren Akzeptanz durch die Anwendenden und in einer schnelleren Adaption der Technologie in der Praxis widerspiegelt. Die aktuell bekanntesten BIM-Anwendungsfälle bzw. die daraus resultierenden BIM-Fachmodelle sind im Bild 7 in Anlehnung an [20] aufgeführt.

Es gilt aber auch anzumerken, dass jede Unterteilung einer Aufgabe in kleiner Unteraufgaben bestimmte Nebeneffekte hervorruft. In diesem Fall ist es insbesondere die Vorhaltung von Schnittstellen, die eine Zusammenführung der Bauwerksdaten zu einem gemeinsamen Datenmodell in der CDE oder zu einer anderen Informationsmanagementplattform ermöglicht. Dabei haben sich in der Praxis zwei Ansätze durchge-

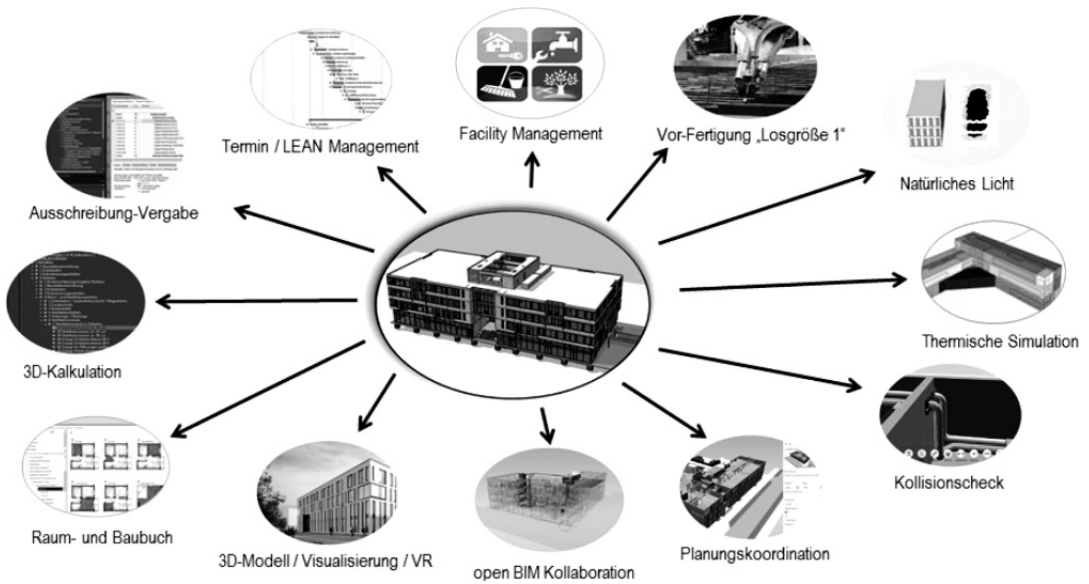


Bild 6. BIM-Gesamtmodell als Koordinationsmodell inkl. verschiedenster BIM-Fachmodelle

Awf-Nr	Awf Bezeichnung	Fachmodell
Awf 1	Bestandserfassung	3D-Bestandsmodell
Awf 2	Planungsvarianten - untersuchungen	3D-Architekturmodell
Awf 3	Visualisierung (Öffentlichkeitsarbeit)	3D-Architekturmodell
Awf 4	Bemessen und Nachweiseführung	3D-Tragwerksmodell
Awf 5	Koordination der Fachgewerke	Koordinationsmodell
Awf 6	Fortschrittskontrolle der Planung	Koordinationsmodell
Awf 7	Erstellung von Entwurfs- und Genehmigungsplänen	3D-Architekturmodell
Awf 8	Arbeits- und Gesundheitsschutz	3D-Architekturmodell
Awf 9	Planungsfreigabe	3D-Architekturmodell
Awf 10	Kostenschätzung und Kostenberechnung	5D-Kostenmodell
Awf 11	Leistungsverzeichnis, Ausschreibung, Vergabe	5D-Kostenmodell
Awf 12	Terminplanung der Ausführung	4D-Ablaufmodell
Awf 13	Logistikplanung	Koordinationsmodell
Awf 14	Erstellung von Ausführungsplänen	3D-Architekturmodell
Awf 15	Baufortschrittskontrolle	4D-Ablaufmodell
Awf 16	Änderungsmanagement	3D-Architekturmodell
Awf 17	Abrechnung von Bauleistungen	3D-Architekturmodell
Awf 18	Mängelmanagement	3D-Bestandsmodell
Awf 19	Bauwerksdokumentation	3D-Bestandsmodell
Awf 20	Nutzung für Betrieb und Erhaltung	3D-Bestandsmodell
Awf 21	Maschinensteuerung	3D-Architekturmodell

Bild 7. BIM-Anwendungsfälle und die dazugehörigen BIM-Fachmodelle (nach [20])

setzt. Einerseits kann der Austausch der Bauwerksdaten im Sinne eines Closed-BIM-Ansatzes mithilfe von proprietären Formaten oder silohaften Softwarelösungen erfolgen oder andererseits als Open-BIM-Ansatz, bei dem der Austausch der Daten durch den Einsatz der neutralen Datenschnittstelle Industry Foundation Classes (IFC) erfolgt. Beide Ansätze, aber auch eine Mischung aus beiden, haben sich in der Praxis bereits bewährt. Des Weiteren ist durch die fachspezifische Betrachtung des gesamten Bauwerksmodells eine stetige Koordination und Überprüfung der Fachmodelle notwendig. Hierzu werden ausgewählte Fachmodelle wie z. B. das Tragwerks- und technische Gebäudeausrüstungsmodell oder Architekturmodell überein-

andergelegt, sodass Kollisionen und Unstimmigkeiten bzw. Änderungen schnellstmöglich erkannt, besprochen und geklärt werden können. In der Fachwelt werden diese überlagerten Modelle als Koordinationsmodelle bezeichnet (vgl. Bild 6) und stellen häufig nicht das ganze Bauwerksmodell, sondern nur partielle Bauteile des Bauwerksmodells dar. Da die Modellprüfung ständig durchzuführen ist (vgl. Bild 8), hat sich in der Branche das neue Tätigkeitsfeld des „Modellprüfers“ manifestiert. Diese Tätigkeit besitzt einen sehr hohen Stellenwert in der BIM-Welt, da diese entscheidend ist, ob ein BIM-Projekt erfolgreich und wirtschaftlich abgebildet werden kann oder nicht! Ganz aktuelle Entwicklungen in der BIM-basierten Planung erlauben die

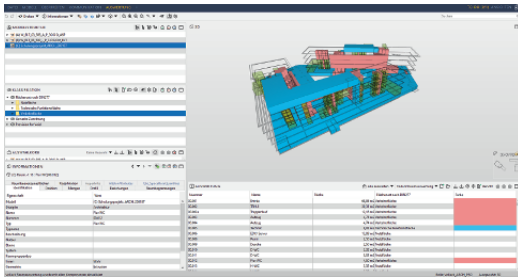


Bild 8. Beispiel einer im Prüfsystem „Solibri“ durchgeführten regelbasierten Prüfung der im Architekturmodell hinterlegten Gewerke zur Weitergabe an die 5D-Kostenschätzung [21]

Protokollierung der Änderungen als Informationsentität des BIM-Modells, was die Arbeit der Modellprüfung erleichtert.

2.2.3 Nutzung kollaborativer Prozesslandschaft im Bauwesen

Digitalisierung bedeutet aber nicht nur den Einsatz von neuen Methoden und neuen Technologien. Vielmehr gilt es auch alte festgefahrene Prozesswege und Strukturen zu öffnen bzw. aufzubrechen, sodass der Einsatz dieser neuen Ansätze wie BIM oder Lean, aber auch Robotik und künstliche Intelligenz überhaupt möglich ist. Dabei spielt der Mensch eine zentrale Rolle. Dieser ist es gewohnt, seine Arbeit immer auf eine gleiche und ihm bekannte Art und Weise zu verrichten. Ein Verlassen dieser sogenannten „Trampelpfade“ birgt oft ein Risiko oder einen höheren Arbeitsaufwand [3]. Dieses Hemmnis gilt es in erster Hinsicht zu lösen, indem die entsprechende Person langsam an die neue Arbeitsweise herangeführt wird und gleichzeitig eine Eliminierung alter ineffizienter Arbeitsstrukturen erfolgt. Der Faktor Zeit ist dabei entscheidend, was aus Bild 9a deutlich erkennbar ist.

Neben diesem kontinuierlichen Changemanagement gilt es zudem, silohafte Gedankenmuster bzw. Organisationsstrukturen aufzulösen und diese durch interdisziplinäre und kollaborative Arbeitsweisen zu ersetzen. Erst durch eine fächer- und prozessübergreifende Denkweise, die über die gesamte Lebenszyklusphase des Bauprojekts besteht, lassen sich die enormen Potenziale der Digitalisierung heben. Dabei gilt es zum einen neue Vergabemethoden wie z. B. die Methode *Design-and-Build* zu testen, zum anderen Vorurteile gegenüber anderen Prozessbeteiligten wie z. B. zwischen Fachplanern, Handwerkern oder Baufirmen zu entschärfen und die silohafte und unverzahnte Abarbeitung der einzelnen Aufgabenstellung zu beseitigen.

Fakt ist, dass die Digitalisierung ein Querschnittsthema über alle Disziplinen hinweg darstellt und sollte bzw. muss daher auch als ein solches betrachtet werden. Eine Aktivierung der enormen Potenziale und Mehrwerte der digitalen Transformation sind erst dann möglich. Solange diese Randbedingung in der tägli-

chen Praxis nicht erkannt und umgesetzt wird, werden die Kosten zur Digitalisierung teurer sein als der Nutzen, was sich anhand einer länger andauernden Implementierungsphase verifizieren lässt (vgl. Bild 9b).

Um nun diese digitale Verzahnung der Abläufe und Interdisziplinarität fördern zu können, ist es sehr wichtig, vor Beginn einer digitalen Transformation des Unternehmens zu analysieren, inwiefern Digitalisierungspotenziale im Prozess des Unternehmens oder im Projekt bestehen. Aktuell gilt es daher, zuerst den traditionellen Ablauf zur Umsetzung einer Aufgabe mithilfe einer geeigneten Sprache bzw. Notation wie z. B. Business Process Model and Notation (BPMN) in Form einer Prozesslandschaftskarte zu visualisieren (vgl. Bild 10). Unbestritten ist hier sicherlich der Fakt, dass nur wenige Branchen existieren, welche ihre Abläufe derart „aus dem Bauch heraus“ entwickeln bzw. deren Erfolg von der Kompetenz und Berufserfahrung der entsprechend beteiligten Personen abhängig machen, wie die Baubranche. Die Folge ist, dass aufgrund der fehlenden klaren Struktur und Vorgabe der Prozessabläufe eine Steigerung der Planungs- und Bauleistung sowie der Qualität kaum möglich ist – egal ob mit oder ohne digitale Komponenten.

Dieses Defizit gilt es schnellstmöglich zu beheben, da die Dokumentation der Prozessketten (engl. workflow) die Grundlage zur Standardisierung und Digitalisierung einer Branche bildet. Andere Branchen wie der Maschinen- und Anlagenbau oder der Wirtschaftssektor haben das bereits eindrucksvoll belegt.

Die Prozesslandschaftskarte erhält somit eine sehr zentrale Rolle zur nachhaltigen und zielorientierten Digitalisierung einer Branche, da an ihr Prozessabhängigkeiten dargestellt, Informationsflüsse in Form eines Input-Output-Schemas erkannt bzw. koordiniert und Potenziale zum Einsatz von digitalen Werkzeugen und Methoden identifiziert werden können. Die Ableitung einer nachhaltigen, transparenten und ethisch vertretbaren digitalen Transformation des Unternehmens wird erst dadurch möglich. Selbst das Vermitteln von Wissen an neue Mitarbeiter hinsichtlich der zu tätigen Abläufe lässt sich dadurch realisieren und bewirkt eine Entlastung älterer Kollegen. Aus diesem Grund nimmt die Abbildung der Planungs-, Bau- und Betriebsprozesse anhand eines Information Delivery Manual (IDM) spezifischen Prozessplans eine feste Größe im Standardisierungsportfolio von BuildingSMART ein [22].

2.2.4 Robotik und KI als Wegbereiter zum seriellen Bau

Die digitale Bauproduktion stellt den nächsten logischen Schritt in der digitalen Transformation der Bauindustrie dar. Als Bindeglied zwischen der digital vernetzten, modellbasierten Planung eines Bauwerks und seiner realen Herstellung (bzw. dessen Bauteile), kann der Einsatz einer digitalen Bauproduktion eine richtungsweisende und produktivitätssteigernde Rol-

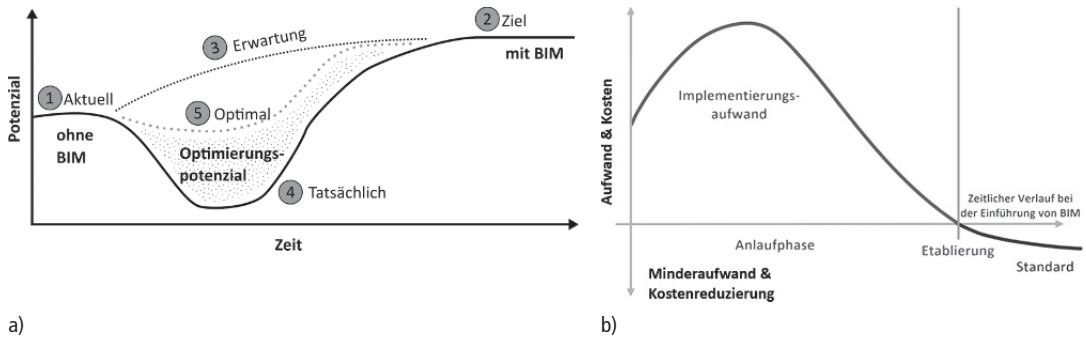


Bild 9. a) Implementierung von BIM in einem Unternehmen in Abhängigkeit der Zeit und des dadurch zu erreichenden Arbeitspotenzials als Soll-Ist-Vergleich, b) Aufwand und Kosten-Entwicklung während der Implementierung von BIM in einem Unternehmen

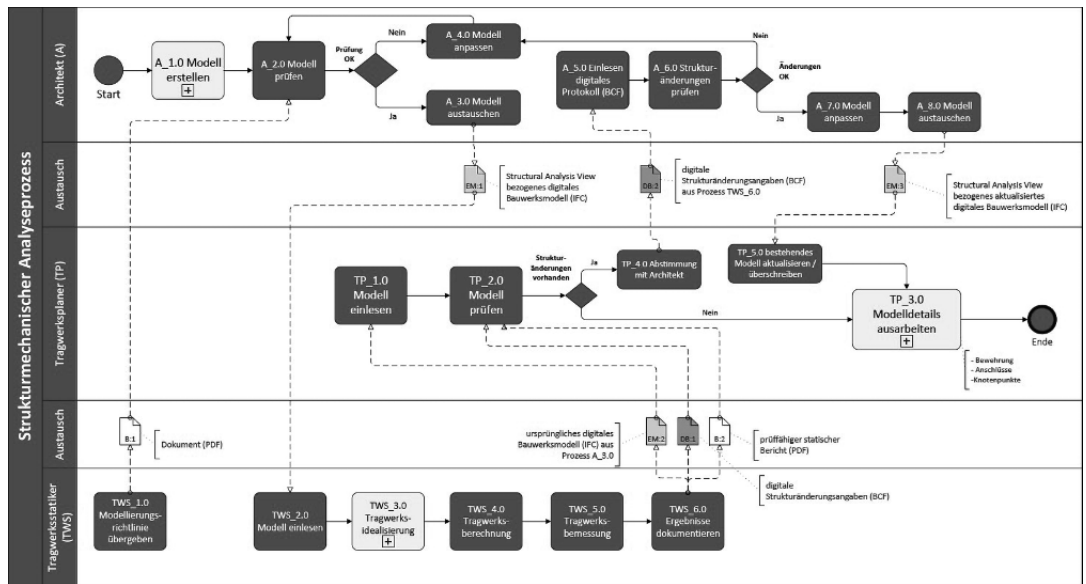


Bild 10. Beispiel eines Auszugs einer BPMN-basierten Prozesslandschaftskarte zur Umsetzung einer modellbasierten Tragwerksplanung

le in der Digitalisierung des Bausektors einnehmen. Den Mehrwert einer digitalen Produktion bspw. in Form des „virtual prototyping“ konnten andere Industriezweige wie die Automobil- oder Anlagenindustrie bereits aufzeigen [23–25]. Im Rahmen des *virtual prototypings* werden Rechenmodelle von den zu entwickelnden Produktionsanlagen erstellt und mithilfe von detaillierten Simulationsstudien analysiert. Hierdurch lassen sich bereits im Vorfeld einer Produktion verschiedenste Probleme, Produktions- und Kalkulationsrisiken, aber auch unwirtschaftliche Produktionsreihenfolgen und Ressourceneinsätze frühzeitig erkennen. Damit können in kurzer Zeit viele Optimierungszyklen und Sensitivitätsbetrachtungen durchlaufen werden, bevor in die tatsächliche Produktion eingestiegen wird [26].

Unter diesem Gesichtspunkt der digitalen Bauproduktion können auch für die Baubranche erfolgversprechende Anwendungsfelder identifiziert werden. Erste Erkenntnisse hierfür wurden allgemein für die Baukonstruktionsprozesse im Hochbau in [27], für den Erdbau in [28], für den konstruktiven Holzbau in [29, 30], für den Stahl- und Metallbau in [6, 31, 32] für den Glas- und Fassadenbau [33–35] sowie für den Beton- und Massivbau in [11, 36–39] dokumentiert.

An dieser Stelle soll ein kurzes Beispiel aus dem Glas- und Fassadenbau angeführt werden: In Zukunft werden beim Fassadenentwurf neben den Anforderungen an die Funktion als thermohygrische Barriere, dem Sonnenschutz und einem ansprechenden ästhetischen Design weitere Punkte zum Nutzerkomfort oder der Interaktion mit der Fassade im Fokus stehen. In [35]

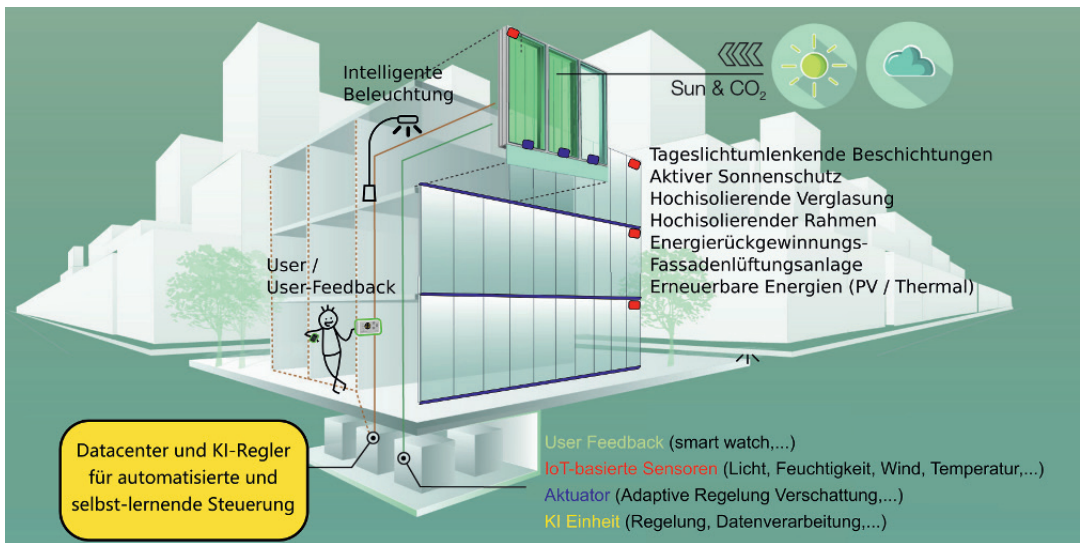


Bild 11. Schematische Darstellung einer cyber-physikalischen Fassade mit Interaktion von Nutzer und KI-Kontrollzentrum (aus [35])

ist eine innovative adaptive Steuerung der Fassade unter Verwendung von künstlicher Intelligenz zur Mehrziel-Pareto-Optimierung beschrieben, indem Modelle der KI mit dem digitalen Zwilling der Fassade zu einem cyber-physikalischen Regelkreis mit Benutzer-Feedback verbunden werden (vgl. Bild 11). Neben der Steigerung des Komforts für den Nutzer durch individuelle Anpassung der Fassade durch die KI ergibt sich ein enormes Potenzial zur Minimierung der Energiekosten des Bauwerks, welche derzeit für ca. 40 % des weltweiten Energiebedarfsverantwortlich sind.

Auch im produzierenden Gewerbe gibt es bereits erste Praxisanwendungen durch die kontinuierlich stattfindende Verbesserung und Bereitstellung von Werkzeugen des virtual prototyping. Ein Beispiel dafür stellt die serielle Produktion von Modulen in der „maxmodul“ Bauweise oder der Produktion eines Dickblechs mithilfe einer CNC-Fräse bei der Fa. Bögl dar. Beim Dickblech wurde zum Beispiel der optimale Fräs- und Bohrvorgang mithilfe einer digitalen Bauproduktion erarbeitet. Hierzu wurde das virtuelle Modell des Bauteils in das kinematische virtuelle Modell der CNC-Fräse integriert, um anschließend auf Basis der beiden zusammengeführten Modelle verschiedenste Fahrwege und Werkzeugeinstellungen simulativ erfassen und analysieren zu können (vgl. Bild 12b). Dadurch konnten kostspielige und aufwendige Versuchsaufbauten vermieden und eine signifikante Steigerung der Produktivität erzielt werden.

Mit der Durchsetzung und stringenten Anwendung der BIM-Methode (vgl. Abschnitt 2.2.1) in der Breite der Beteiligten in Planung und Bauen können erstmalig Konstruktions- und Planungsdaten direkt und ohne größere Hindernisse an die Produktion und Konstruktion weitergeleitet werden. Eine weitere Steige-

rung der Ergonomie im Sinne der Benutzerfreundlichkeit und der unkomplizierten und verlustfreien Kommunikation von Informationen über verschiedene Planungs- und Produktionssoftwareumgebungen hinweg wird künftig die Akzeptanz und weitere Verbreitung der Methoden der digitalen Transformation wie BIM oder digitale Zwillinge weiter steigern und deren ökonomische Potenziale realisieren lassen. Mit der Erfassung und Nutzung entstehender Entwurfsdaten während des gesamten Planungsprozesses sowie der Schnittstellen zwischen Menschen und Maschine lassen sich künftig schließlich sogenannte *smart factories* für das produzierende Baugewerbe erzielen, vgl. Bild 13 [40].

Das Beispiel der Produktion eines Dickblechs in Bild 12b konnte also aufzeigen, dass insbesondere der Bereich der Vorfertigung mit den dort vorhandenen Produktionsumgebungen bereits jetzt vergleichbar mit denen des produzierenden Gewerbes ist, somit steht hier die Entwicklung der Industrie 4.0 (vgl. Abschnitt 2.2.1) für das Bauwesen offen.

Ein Vergleich der ganzheitlich lebenszyklusorientierten Sichtweisen der BIM-Methode mit dem in der Industrie 4.0 etablierten Produktlebenszyklusmanagement (PLM) ([38, 40] und Abschnitt 2.2.2) zur Kollaboration und Integration verschiedener beteiligter Hersteller und Experten über den Lebenszyklus eines hergestellten Produkts mit zugehörigen digitalen Werkzeugen liefert, dass beide Methoden Überschneidungen, aber auch Unterschiede aufweisen. Einerseits integriert das PLM Menschen, Maschinen, Prozesse, Produktteile und Geschäftssysteme, gleichzeitig wird eine weitreichende Datenbasis bezüglich einer Vielzahl an Produktinformationen, Produktionsdaten sowie Produktionsflussinformationen bis hin zu Maschi-

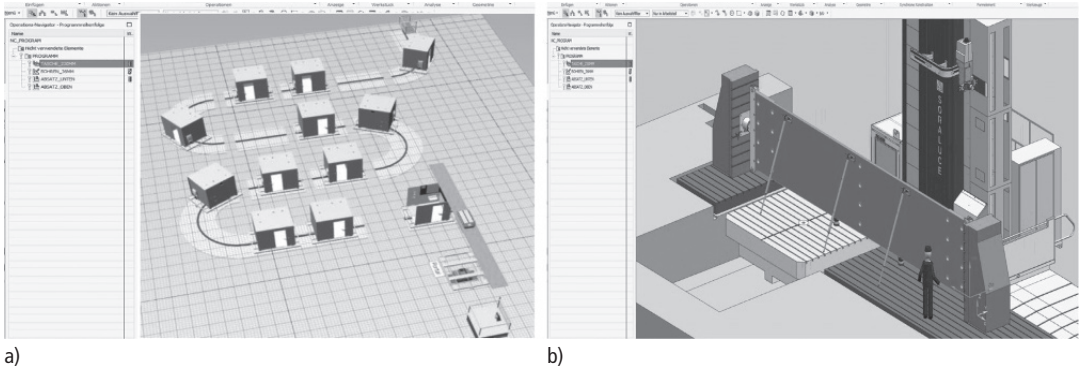


Bild 12. Virtuelle Simulation des Produktionsprozesses a) eines Moduls oder b) eines Dickblechs mit Siemens NX

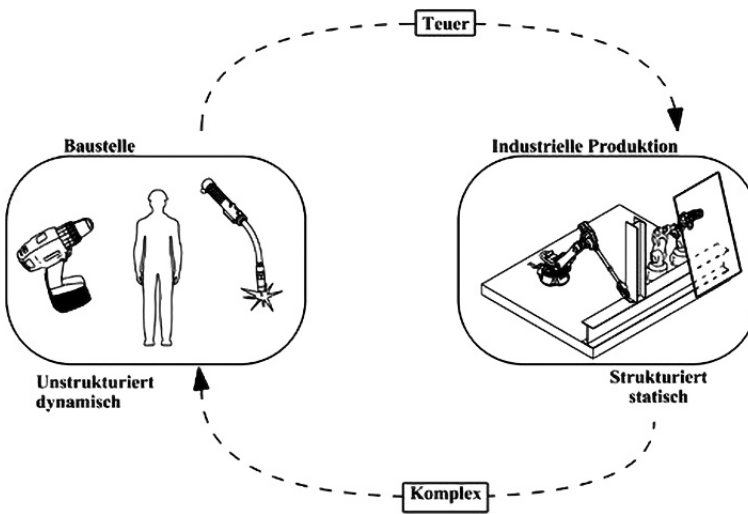


Bild 13. Herausforderung in der Übertragung von Industrie-4.0-Lösungen auf den Bau (nach [41])

nenzustandsinformationen erfasst. Innerhalb des PLM werden die Lebenszyklusphasen *Konzeption, Design, Realisierung und Wartung* differenziert. Demgegenüber stehen die BIM-Lebenszyklusphasen *Konzeption, Design, Konstruktion und Betrieb*. Somit ist ein wesentlicher Hauptunterschied zwischen PLM und BIM die Produktionsumgebung mit verwendeten Produktionsmitteln, da die Bauumgebungen und somit Produktionsbedingungen durch ständige Veränderungen bei hoher Produktvariation gekennzeichnet sind. Für die konkrete Bauproduktion ist daher immer das Aufwand-Nutzen-Verhältnis bzw. der Wirkungsgrad einer Methode kritisch zu hinterfragen, was derzeit zur Folge hat, dass der Einsatz digitaler Bauproduktion nur an Bauteilen mit hohen Wiederholungsraten, sehr komplexen Bauformen oder komplexen Produktionsabläufen wirtschaftlich ist.

Als weiteres Beispiel eines voll-digitalen Planungs- und Fertigungsprozesses für komplexe, 3D gedruckte Knotenpunkte für Freiformfassaden unter Berücksichtigung

der Toleranzen der Unterkonstruktion ist in Bild 14 dargestellt. Zur Erzielung einer wirtschaftlichen Produktion wurde ein voll-digitaler und automatisierter Planungsprozess mit Randbedingungen aus der Produktion gekoppelt. So kann trotz individuell gedruckter Knotenpunkte ein wirtschaftlich konkurrenzfähiges Produkt erzeugt werden.

Die Nutzung moderner maschineller oder adaptiv-maschineller und robotischer Fertigungstechnologien ist ein Hebel zur Reduktion der Produktivitätssteigerungshemmnisse. Aufgrund der heterogenen Struktur der Baubranche mit kleinen und hochspezialisierten Firmen ist der Automatisierungsgrad vor allem im Vergleich zur industriellen Produktion des Maschinenbaus aktuell noch gering. Bisherige Versuche zur Automatisierung der Bauproduktion griffen häufig auf Spezialmaschinen für spezifische Aufgaben zurück, diese Ansätze stellen allerdings aufgrund geringer Flexibilität bezüglich alternativer Produktionsanwendungen sowie der geschlossenen Produktionssystemkonzepte

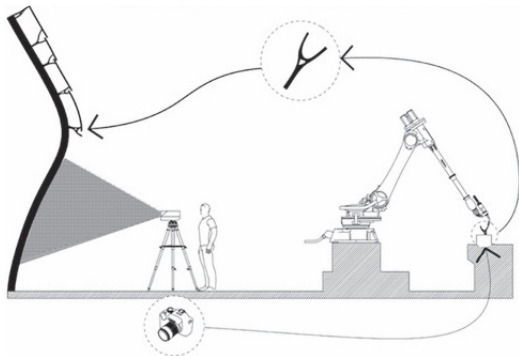
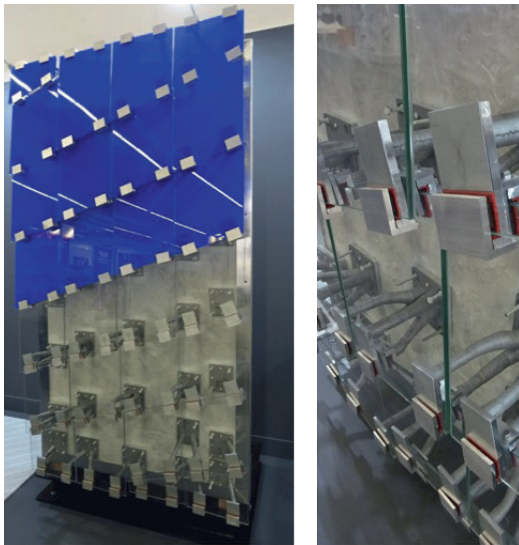


Bild 14. 3D gedruckter Knoten zur Überbrückung von Bauwerkstoleranzen, entstanden aus voll-digitalem Planungsstool gekoppelt mit 4.0 Fertigung (© Chris Borg, aus [11])

on insbesondere für die bauüblichen geringen Produktionslosgrößen (bzw. Unikate) keine agnostischen Lösungen dar. Etablierte Produktionsmethoden und -stoffe bedürfen weiterhin einer kritischen Prüfung bezüglich der Eignung für die maschinengeführte Produktion. Entsprechende Forschungen über eine neue

produktionsgerechte Auslegung von baulichen Elementen sind in [2, 38, 41, 42] dokumentiert.

Mittel- und langfristig betrachtet genügt es aber nicht, nur die technischen Aspekte in den Fokus der Digitalisierungsoffensive zu stellen. Es müssen sich zudem Gedanken darüber gemacht werden, ob die Art und Weise, wie man baut, revolutioniert werden muss. Die unikats-charakterartige Bauweise, die die dominierende Rolle im deutschsprachigen Bauwesen einnimmt, stellt ein Hemmnis in der Digitalisierungsgeschwindigkeit dar. Hinzu kommt, dass innerhalb der DACH-Länder eine sehr kleinteilige und heterogene Firmenlandschaft existiert, die sich von Projekt zu Projekt wieder neu zusammenfinden muss. Andere Länder wie z. B. die USA oder China sind schneller in der Umsetzung von digitalen Strategien, da dort die Anwendung von standardisierten Bauteilen, Komponenten und immer wiederkehrenden Organisationsstrukturen den Großteil des Bausektors ausmachen. Serielles Bauen ist dort der Stand der Technik. Innerhalb Deutschlands gestaltet sich diese Aufgabe schwieriger, da man sich bewusst für eine individuelle Bauweise à la „made in Germany“ entschieden hat. Eine monoton wirkenden Baukultur, wie die des Plattenbaus, ist häufig in der Gesellschaft aus kulturhistorisch-ästhetischen Gründen nicht erwünscht.

Nichtsdestotrotz gibt es erste Ansätze in der Industrie, wie z. B. der Firma Goldbeck oder Max Bögl, aber auch der Politik, die eine serielle Bauweise fördern und in Betracht ziehen [43–45]. Ziel dabei ist es, die Produktivität zu steigern und dem Fachkräftemangel entgegenzuwirken, indem eine Bauweise forciert wird, die gewissen Standards und Regeln folgt. Die Umsetzung einer seriellen Bauweise muss aber genau durchdacht und von Bauwerkstyp zu Bauwerkstyp kritisch hinterfragt werden. Robotik und künstliche Intelligenz können dabei den komplexeren Prozess zur Identifizierung einer geeigneten Baustruktur und leistungsfähigen sowie wirtschaftlichen Baumsetzung deutlich unterstützen. Ganz dem Motto: einmal planen, n-mal produzieren und m-mal bauen (vgl. Bild 15), wobei die Individualität und Ästhetik des finalen Bauwerks nicht an der seriellen Produktionsphilosophie leiden soll.



1 x planen



n x produzieren



m x montieren

Bild 15. Grundsatz und Vision einer seriellen Bauweise

3 Stand der digitalen Transformation in der Anwendung

3.1 Wie weit sind Akzeptanz und Implementierung der Methode BIM in der Praxis?

Wie Bild 16 entnommen werden kann, arbeitet bereits ca. ein Drittel der Personen im Bausektors mit der BIM-Methode. Dies bedeutet aber auch, dass ca. zwei Drittel der Mitarbeiter noch nicht in Kontakt mit der neuen Methode und deren Technologien gekommen ist. Es lässt sich nun die Frage stellen, warum das so ist? Gründe für die zögerliche Implementierung von BIM in den Unternehmen gibt es einige. Aufgrund des Baubooms haben einerseits viele Firmen keine Zeit, neue Technologien in ihr Unternehmen einzuführen, ohne dabei das Tagesgeschäft vernachlässigen zu müssen. Andererseits besitzen viele kleinere und mittelständische Planungs- und Baubüros nicht die personellen Ressourcen, um Mitarbeiter für diese Aufgabe abzustellen bzw. neue einzustellen. Somit obliegt die Implementierung dieser neuen Methode primär den größeren Firmen, welche genügend Ressourcen und Kapital in derartige Aufgaben investieren können [46].

Es steht aber außer Frage, dass zeitnah die Anwendung der BIM-Methode kommen wird, da diese zum einen politisch eingeführt und gefordert wird. Zum anderen werden zukünftig die Investoren den Mehrwert der BIM-Methode nicht nur in der Steigerung der Bauproduktivität und -qualität sehen, sondern auch das Vermarkten und Nutzen der Daten als Investitionskapital ausschöpfen. Nach [47] werden bis ins Jahr 2030 über 66 % der Bauprojekte mit der BIM-Methode umgesetzt werden.

Wie können es nun kleinere bzw. mittelständische Unternehmen vermeiden, den Anschluss zur Umsetzung der digitalen Transformation zu verlieren. Bast [46] hat im Jahr 2019 eine Studie durchgeführt, inwieweit ein Outsourcing von BIM-Management und BIM-Tätigkeiten als sinnvoll zu erachten ist. Aus den Umfragen hat sich ergeben, dass beispielsweise kleinere Firmen mit einem geringen Jahresumsatz und wenig BIM-

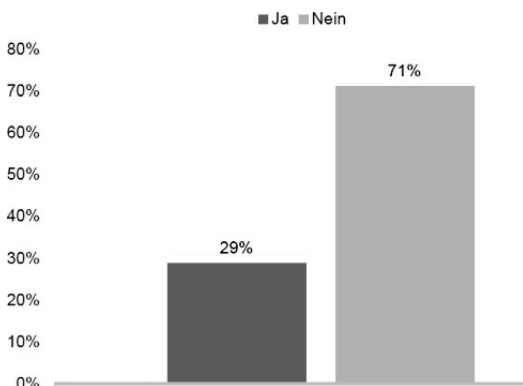
Knowhow, die BIM-Aufgabe gern auf einen BIM-Spezialisten übertragen würden. Dadurch würden sich mehrere Effekte ergeben. Die Fachfirmen, vor allem Planer, könnten ihre agile Struktur und ihre Individualität beibehalten und die täglichen Aufgaben der BIM-Methode, wie zum Beispiel Koordination, Prüfung, Abstimmung etc., an den BIM-Experten übertragen. Einzig die Umsetzung der Fachaufgaben in Form eines modellbasierten Ansatzes müssten durch die Firma selbst getragen werden. Weitere Szenarien können aus [46] bzw. dem Bild 17 entnommen werden.

3.2 Welche Awf lassen sich mit dem aktuellen Wissen wirtschaftlich umsetzen?

Neben der Frage, ob und wie die BIM-Methode eingesetzt wird, muss auch darauf geachtet werden, dass man BIM-Anwendungsfälle (Awf) realisiert, welche wirtschaftlich sinnvoll und technisch umsetzbar sind. Wie in Bild 7, Abschnitt 2.2.2 dargestellt ist, existiert ein reiches Set an BIM-Anwendungsfällen. Jedoch lässt sich eine Vielzahl dieser Anwendungsfälle noch nicht effizient in der täglichen Praxis einsetzen und befindet sich gegenwärtig noch in der Entwicklungs- und Testphase. Aus einer bei der Firma Schlagmann-Poroton durchgeführten Umfrage, welche Anwendungsfälle für die tägliche Praxis hilfreich wären, hat sich ergeben, dass solche, die aktuell auch technisch realisierbar sind, die praktikabelsten wären (vgl. Bild 18). Hierzu zählt die 3D-Kollisionsprüfung, die 3D-Simulation/Visualisierung und die 5D-Kostenanalyse. Diese drei Anwendungsfälle sollen nachfolgend kurz beschrieben werden.

Anwendungsfall 5 – 3D-Kollisionsprüfung

Die 3D-Kollisionsprüfung ist ein für die tägliche Praxis wichtiger Awf, da erst durch die Überlagerung der einzelnen Fachmodelle, wie z. B. das TGA-Modell mit dem Tragwerksmodell oder das Architekturmodell mit dem Fassadenmodell, Unstimmigkeiten bei der Planung und Ausführung erkannt werden können (vgl. Bild 19). Mithilfe dieses Anwendungsfalls lässt sich so-



Umfrage:
Haben sie schon einmal mit der BIM-Methode gearbeitet?

Bild 16. Umfrageergebnis zur Anwendung von BIM im Wohnungsbau

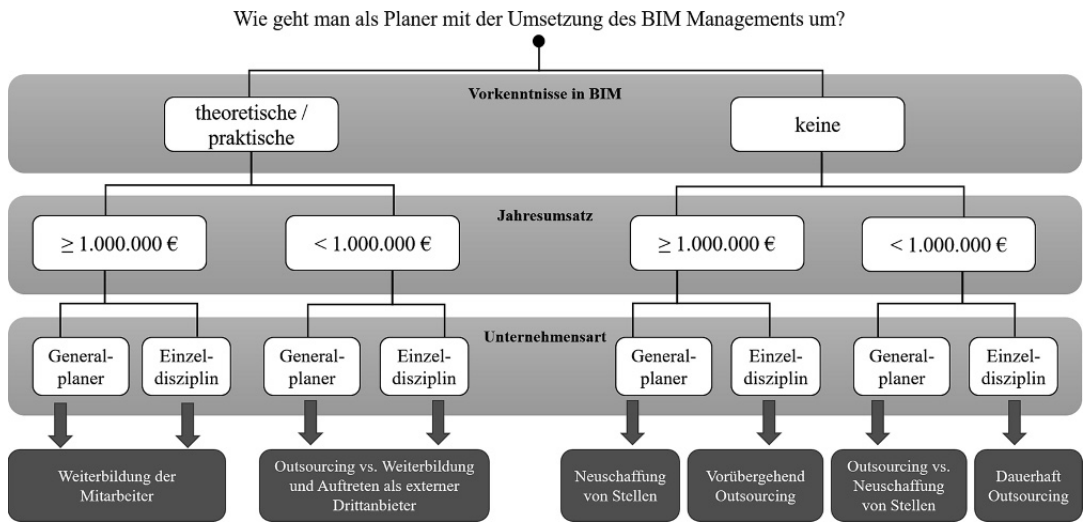


Bild 17. Entscheidungshilfe zur unternehmensinternen Implementierung der BIM-Methode

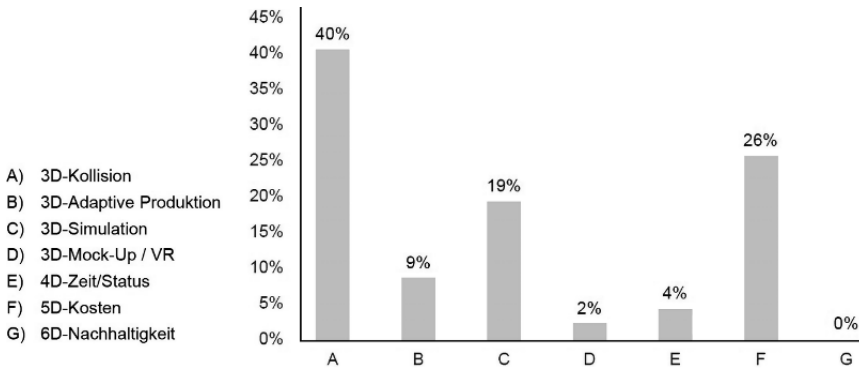


Bild 18. Ergebnis der Umfrage zu praktikablen und notwendigen BIM-Anwendungsfällen

mit bereits in einer frühen Phase eine Vielzahl an Planungs- und Zusammenbaufehlern, aber auch Kollisionen oder Informationslücken erkennen. Regelbasierte Systeme wie z. B. Nemetschek Solibri oder Think Project Desite unterstützen diesen Prozess, sodass aktuell eine praxisingerechte und wirtschaftliche Nutzung des Aufwands möglich ist.

Anwendungsfall 3 – 3D-Simulation/Visualisierung

Innerhalb eines 3D-BIM-Modells wird täglich eine Vielzahl an Informationen gespeichert. Jedoch bilden aktuell noch 2D-Pläne die tägliche Schnittstelle zur Baustelle, welche eine Vielzahl an Fehlern und Missinterpretationen hervorrufen können. Aus diesem Grund ist die Möglichkeit der Information anhand des BIM-Modells durch eine Animation, Simulation oder interaktive Visualisierung von sehr großem Mehrwert. Die Macht der Visualisierung eines Objekts/Bauteils

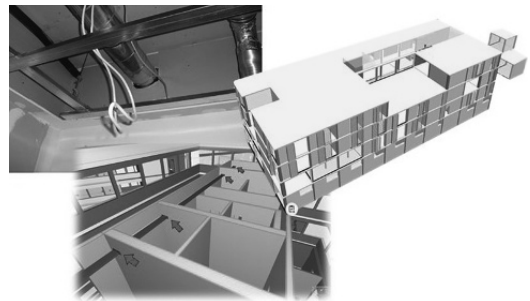


Bild 19. Beispiel einer modellbasierten und realen Kollision

oder einer Information wird oft unterschätzt, lässt sich aber vergleichsweise einfach anhand bestehender Fachmodelle erzeugen. Durch die komplementäre Nutzung von Virtual Reality (VR) oder Augmented Reality



Bild 20. Beispiel einer modellbasierten Visualisierung

(AR) Technologien konnte der Mehrwert der visuellen Durchdringung und Veranschaulichung von Information gegenüber dem Bauherrn, Investor, aber auch Projektmitarbeitern noch deutlicher verstärkt werden. Besprechungen lassen sich somit besser koordinieren und zielgerichteter strukturieren, Details und/oder Umsetzungsprobleme besser besprechen sowie Missinterpretationen von Informationen und Abläufen einschränken (vgl. Bild 20). Für die Praxis stellt daher der leistungsfähige und komplexitätsreduzierende Awf 3 eine sehr wichtige BIM-Komponente dar.

Anwendungsfall 10 – 5D-Kostenschätzung

Am Ende eines Planungsprozesses bestimmt die Höhe der anfallenden Baukosten, ob eine Realisierung des geplanten Bauwerks durchgeführt wird oder eine budget-bedingte Optimierung erforderlich wird. Klassische Kostenschätzungen beruhen auf Erfahrungswerten und aufwendigen Massenermittlungen aus den 2D-Plänen. Komplexe Details oder geometrische Formen bleiben oftmals aufgrund von Vereinfachungsmethoden unberücksichtigt. Eine sehr allgemeine Schätzung der Kosten ist die Folge, da häufig auf die individuellen Besonderheiten des Bauwerks nicht intensiv eingegangen werden kann. Besonders an diesem Punkt besitzt der Anwendungsfall einer modellbasier-

ten Kostenschätzung seine Vorteile. Massen, Informationen und Strukturen, die zur Kalkulation des Bauwerks erforderlich werden, lassen sich direkt aus dem 3D-Modell ableiten (vgl. Bild 21). Ergänzt man die Eigenschaftsliste eines Bauteils z. B. im Architektur-fachmodell um Informationen wie Gewerke oder einen Kostenschlüssel, so ist eine (teil)automatisierte Bemusterung, Kostenschätzung und Erstellung des Leistungsverzeichnisses zur Ausschreibung möglich [1, 48]. Softwaresysteme wie RIB iTwo oder Nemetschek Nevaris, aber auch cloud-basierte Systeme wie NOVA AVA ermöglichen diesen Prozess. Eine praxisgerechte und wirtschaftliche Implementierung dieses Anwendungsfalls ist dadurch möglich.

3.3 Der Weg zur breiten Adaption von digitalen Werkzeugen und interdisziplinärer Zusammenarbeit

Jede Modernisierung einer Tätigkeit, egal ob in der Medizin, der Wirtschaft oder dem Bauwesen, hat einen langen und schwierigen Weg der praxisgerechten Adaption hinter sich. Um eine neue Idee oder eine neue Technologie erfolgreich in der Praxis etablieren zu können, sind viele Hebel in Bewegung zu setzen. Zu den wichtigsten Kriterien gehören neben den technischen

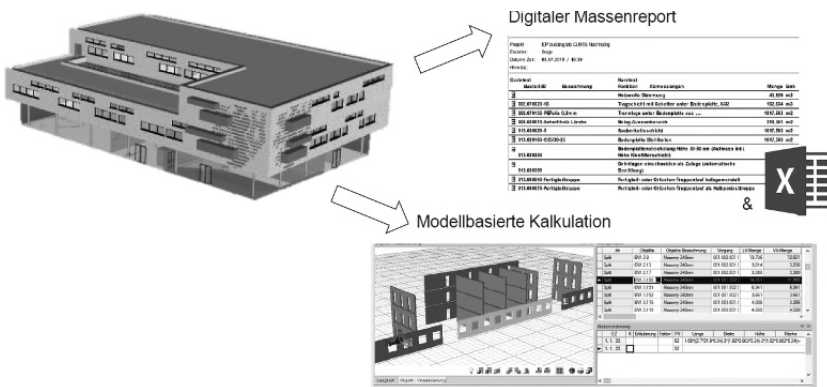


Bild 21. Beispiel einer modellbasierten Kostenschätzung



Bild 22. Säulen zur erfolgreichen Umsetzung eines BIM-basierten Bauprojekts (nach [40])

Werkzeugen vor allem die Menschen, deren Vision, Fähigkeiten und Willenskraft dazu. Wie bereits eingangs erwähnt, sind viele technische Werkzeuge zur erfolgreichen digitalen Transformation des Bauwesens vorhanden. Nur, wer soll diese bedienen und effizient miteinander kombinieren?

Hierzu wird eine neue Generation an Mitarbeitern benötigt, welche diese Technologie zu nutzen weiß und diese nach vorn treibt. Diese Mitarbeiter müssen aber auch beherzigen, dass in naher Zukunft ein Bauprojekt nicht mehr als eine individuelle fachspezifische Aufgabenstellung zu sehen und abzuarbeiten ist, sondern das Projekt als Ganzes im Team. Hierzu müssen interdisziplinäre Verbindungen zu allen an dem Projekt beteiligten Prozessen und Personen hergestellt und verknüpft werden. Selbst diejenigen, die auf der Baustelle die Umsetzung des Bauwerks durchführen, müssen mit integriert werden. Erst dadurch wird eine wirtschaftliche und effiziente Umsetzung des Bauprojekts möglich sein (vgl. Bild 22).

Ein möglicher erster Ansatz besteht darin, dass die Forschungs- und Lehrinstitutionen ihren Blick in die deutsche Bauwirtschaft mehr schärfen, um Lösungsansätze einerseits und andererseits einen Kulturwandel hin zu kollaborativen Denk- und Arbeitsweisen der zukünftigen Ingenieurinnen und Ingenieure, aber auch Handwerkern zu fördern. Hierzu muss in der Hochschullandschaft das Verständnis für die derzeitigen Themen, Prozessabläufe und Komplikationen aus der täglichen Praxis noch stärker geweckt werden. Insbesondere bedarf es einer zeitnahen Modernisierung der Lehre zur verständlichen und praxisgerechten Aufbereitung von komplexen Forschungsergebnissen im Bereich der digitalen Transformation sowie der Zukunftsthemen der KI im Bereich der gebauten Umwelt.

Als ein aktuelles Musterbeispiel zur Förderung der kollaborativen und interdisziplinären Zusammenarbeit zwischen Architektur, Bauingenieurwesen und Immobilienwirtschaft wird im Rahmen eines gemeinsamen

Lehrkonzepts zwischen der OTH Regensburg, der Universität Regensburg sowie der TU München kooperiert. Die Aufgabe dieses gemeinsamen interdisziplinären Projekts besteht in der erfolgreichen Abwicklung eines Bauprojekts in Form eines Teams mit Studierenden aus den unterschiedlichen Fachbereichen unter Einbringung und optimaler Nutzung ihrer Kompetenzen und Ressourcen. Die Organisation und Entwicklung der Bauprojekte erfolgte dabei mithilfe der BIM-Methode (vgl. Bild 23). Hierzu werden im ersten Schritt von den Studierenden Organisationsstrukturen zur Koordination des Projekts festgelegt, eine gemeinsame Plattform zum zentralen Austausch der Daten unter Berücksichtigung der zu erbringenden Leistungen und Koordinationsaufgaben aufgesetzt und eine architektonische, bautechnische und betriebswirtschaftliche Bearbeitung des Projekts anhand eines modellbasierten Ansatzes durchgeführt.

Erste Erfahrungen des jährlich veranstalteten Projekts waren, dass es zu Beginn meist Diskussionsbedarf bezüglich des Verstehens bzw. Akzeptierens individueller Bedürfnisse der einzelnen Fachdisziplinen gibt. Diese Startschwierigkeiten lösen sich rasch durch die Erkenntnis, dass eine kollaborative Arbeitsform auf der Basis einer gemeinsamen digitalen Plattform schneller und ressourcenschonender zum Ziel führt. Insbesondere ist festzustellen, dass bei den Studierenden positive Erkenntnisse nachhaltig verankert werden, da sie den Mehrwert einer BIM-basierten Planung etwa durch effizientere und sicherere Kalkulation des Bauwerks auf Basis der Modelldaten, transparentere Kommunikation anhand des Modells, Ermittlung der CO₂-Emission des Bauwerks anhand der Modelldaten oder Nutzung des Modells für Vertriebszwecke durch den Einsatz von Virtuell Reality Systemen und Mock-Up Modellen sehen und nutzen können. Diese wichtigen Erfahrungen werden die Studierenden in ihrer Rolle als zukünftige Baubeteiligte sowie Betriebswirte in die Praxis transportieren. Eine weitere wichtige Erkenntnis der Studierenden ist, dass sie als Team effektiver zum Ziel kommen als eine einzelne Gruppe, die redundante Arbeitsschritte aufgrund der unkoordinierten Schnittstellen zu leisten hat.

Anhand dieses Beispiels kann erkannt werden, dass die jahrzehntelangen Erfahrungen aus der täglichen Praxis zur Steuerung eines Projekts und die darin gelebte Kultur von entscheidender Bedeutung für den Erfolg eines Bauprojekts sind. Um dieses benötigte Wissen zu-



Bild 23. Verschiedene BIM-Modellvarianten, die aus der gemeinsamen Aufgabenstellung entstanden sind (OTH Regensburg und [49])

künftig effizienter verwerten zu können, ist die Sammlung des Organisations- und Ablaufwissens wichtig und kann dann durch den Einsatz von KI-Technologien zur Unterstützung der Projektbeteiligten als eine Art „Entscheidungswerkzeug“ herangezogen werden. Auf die Besonderheiten von KI-Technologien wird im zweiten Teil dieses Beitrags in der nächsten Ausgabe des Mauerwerk-Kalenders eingegangen. Hierbei werden verschiedene KI-Grundlagen, aber auch ausgewählte Beispiele aus der Baupraxis dargestellt.

4 Fazit und Ausblick

Das Fazit zur digitalen Transformation

Wir erleben derzeit gesellschaftliche und ökonomische Folgen einer Pandemie, die den Fokus auf künftige Formen des sozialen Miteinanders, aber auch des Wirtschaftens und insbesondere des Umgangs mit natürlichen Ressourcen lenken. Die momentane Verknappung von Lebensmittel-, aber auch Bauprodukten wirft die Frage auf, inwiefern eine weiter fortgeschrittene digitale Transformation des Bauwesens als Lösungsansatz dienen kann. Zudem wird von der digitalen Transformation und insbesondere ihren Erscheinungsformen, wie z. B. BIM, jede Person und damit konsequenterweise auch jedes Unternehmen direkt oder indirekt betroffen sein. Insofern ist „ob“ nicht die Frage, sondern „wie“ die digitale Transformation von allen Beteiligten aus Praxis, Forschung und Lehre baupraktisch bezüglich der Fragen zur Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit und Umsetzbarkeit angegangen wird. In diesem Beitrag wurden zunächst Hintergründe und Definitionen zur digitalen Transformation rekapituliert und in einen für das Bauingenieurwesen relevanten Kontext gesetzt. Eingangs wurden hierzu die Potenziale und Gründe für die Umsetzung einer digitalen Transformation angeführt. Um erkennen zu können, welche Möglichkeiten aktuell und in Zukunft bestehen, aber auch um sich auf das Wesentliche konzentrieren zu können, wurde hierzu die Entstehung der Bauwelt von der ursprünglichsten Idee über Methoden bis hin zur Nutzung von Hightech-Technologien beschrieben.

Darauf aufbauend wurde die in der Baubranche am weitesten verbreitete Methode BIM zur Digitalisierung des Bauwesens erklärt. Themengebiete wie der digitale Zwilling, Einsatz von digitalen Werkzeugen, BIM-Anwendungsfälle, aber auch die Definition von Prozessketten und die Wichtigkeit von interdisziplinären Kollaborationsformen wurden in diesem Abschnitt behandelt. Mit der Komplementierung der BIM-Welt durch die Anwendung von Virtual-prototyping-Ansätzen oder rudimentären Ansätzen der künstlicher Intelligenz bis hin zur seriellen Fertigung von Bauwerken schließt der Block ab.

Im letzten Abschnitt des Beitrags wurde dann der praxistaugliche Einsatz der BIM-Methode nebst mögli-

chen Ansätzen zur Steigerung des Implementierungsgrads von BIM in der Praxis vorgestellt. Hierzu wurden sowohl ein Ansatz zur digital-vernetzen und interdisziplinären Ausbildung der zukünftigen Ingenieure/-innen als auch mögliche Ansätze zum Umgang mit der BIM-Leistung präsentiert.

Der Ausblick zur digitalen Transformation

Die digitale Transformation stellt alle am Prozess des Planens und Bauens Beteiligten vor zwei wesentliche Herausforderungen:

- *technisch*: Anpassung zur Nutzung neuer Technologien (wie BIM und Maschinensteuerung),
- *adaptiv*: Implementierung neuer Arbeitsprozesse (im Büro und auf der Baustelle).

Technische Herausforderungen auf der einen Seite können durch Expertenwissen oder spezifisch trainierten Problemlösungsfähigkeiten gelöst werden. Die Hochschullandschaft muss entsprechende Anpassungen der Curricula und Lehrformen für Studium, aber auch Weiterbildung anbieten, sodass komplexe Forschungsergebnisse so verständlich wie möglich in die Praxis transportiert werden.

Im Gegensatz dazu erfordert der Umgang und die Umsetzung von Maßnahmen für die adaptiven Herausforderungen kreative betriebsspezifische Ansätze, da derzeit keine methodischen Lösungsansätze aus der Forschung dafür zur Verfügung stehen. Selbstverständlich müssen zur erfolgreichen Digitalisierung der Baubranche noch zahlreiche weitere Randbedingungen hinsichtlich Bauweisen, Vergütung, Datenhaltung, Recht, Normen etc. geklärt werden. Dies ist aufgrund der hiesigen Strukturen eher ein gradueller statt disruptiver Prozess. Aber auch der Wechsel vom Zeichenbrett auf das CAD-System oder der manuellen Fertigung einer Wand hin zur stationär-industriellen Fertigteilfertigung hat eine gewisse Anlaufzeit benötigt. Innerhalb der mit dem Bauen befassten Organisationen finden sich beide Herausforderungen bei der Arbeit mit Daten sowie deren Nutzung. Die Entwicklung einer Strategie dafür ist daher auf Ebene der Führungskräfte dringend geboten.

Es braucht einen Mentalitätswandel hin zur digitalen Arbeitsweise in Forschung, Lehre und Praxis, jedoch nicht zum Selbstzweck der Datenerhebung und -verarbeitung. Vielmehr muss ein Verständnis für das Potenzial der digitalen Transformation und seiner Methoden wie BIM und Robotik als wichtige und sinnvolle Grundlage bei der evidenz- und faktenbasierten Entscheidungsfindung durch Daten und deren Analyse innerhalb der Entwicklung einer baulichen Struktur vermittelt und befolgt werden. Es muss aber trotz aller effizienzsteigernden Möglichkeiten der digitalen Transformation auch anerkannt werden, dass künftig digitale Planungen frühzeitiger beginnen und zu definieren (und mit den Bauherren abgestimmten) Zeitpunkten fixiert werden müssen, nach denen Umplanungen infolge von Bauherrenwünschen dann nicht mehr möglich sind. Mit dem Verständnis der Grundla-

gen und Methoden wird mithilfe eines guten Change-Managements durch mutige und couragierte Baufachleute der Zukunft eine technisch-prozessorientierte, rechtlich sinnvolle und betriebswirtschaftlich interessante digitale Transformation gelingen.

5 Literatur

- [1] Borrmann, A.; König, M.; Koch, C.; Beetz, J., Editors (2015) *Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*, VDI-Buch, Springer Vieweg, Wiesbaden.
- [2] Kraus, M.A.; Obergriener, M.; Lammel, L. (2021) *Digitale Transformation und Künstliche Intelligenz – Herausforderungen und Lösungsansätze bei der Kombination von Theorie und Praxis*, Ingenieurbaukunst 2022, Ernst & Sohn, Berlin.
- [3] Waldherr, G. (2021) *Beton und Bytes: Wie Bauen das Fundament für unsere Zukunft schafft*, Reline Verlag, München.
- [4] Boschert, S.; Rosen, R. (2016) Digital twin – the simulation aspect, in *Mechatronic futures*, Springer, pp. 59–74.
- [5] Raj, P.; Evangeline, P. (2020) *The Digital Twin Paradigm for Smarter Systems and Environments: the Industry Use Cases*, Academic Press.
- [6] Xiang, F.; Zhi, Z.; Jiang, G. (2018) *Digital twins technology and its data fusion in iron and steel product life cycle*, ICNSC 2018 – 15th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, pp. 1–5, <https://doi.org/10.1109/ICNSC.2018.8361293>.
- [7] Bolton R.N. et al. (2018) Customer experience challenges: bringing together digital, physical and social realms, *J. Serv. Manag.* **29** (5), 776–808, <https://doi.org/10.1108/JOSM-04-2018-0113>.
- [8] Lim, K.Y.H.; Zheng, P.; Chen, C.H. (2020), A state-of-the-art survey of Digital Twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives, *J. Intell. Manuf.* **31** (6), 1313–1337, <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01512-w>.
- [9] Lu, Q. et al. (2020) Developing a Digital Twin at Building and City Levels: Case Study of West Cambridge Campus, *J. Manag. Eng.* **36** (3), p. 05020004, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)jme.1943-5479.0000763](https://doi.org/10.1061/(asce)jme.1943-5479.0000763).
- [10] Boje, C.; Guerriero, A.; Kubicki, S.; Rezgui, Y. (2020) Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research, *Automation in Construction*, vol. **114**. Elsevier B.V., Jun., <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179>.
- [11] Kraus, M.A.; Drass, M.; Hörsch, B.; Schneider, J.; Kaufmann, W. (2021) Künstliche Intelligenz – multiskale und cross-domäne Synergien von Raumfahrt und Bauwesen, in *Beton-Kalender 2022* (Hrsg. Bergmeister, K.; Finerloos, F.; Wörner, J.-D.), Ernst & Sohn, Berlin.
- [12] Floridi, L. (2013) *The ethics of information* Oxford University Press.
- [13] Sacks, R.; Brilakis, I.; Pikas, E.; Xie, H.S.; Girolami, M. (2020) Construction with digital twin information systems, *Data-Centric Eng.*, vol. **1**, <https://doi.org/10.1017/dce.2020.16>.
- [14] Sacks, R.; Bloch, T.; Katz, M.; Yosef, R. (2019) Automating Design Review with Artificial Intelligence and BIM: State of the Art and Research Framework, in *Computing in Civil Engineering 2019: Visualization, Information Modeling, and Simulation*, American Society of Civil Engineers Reston, VA, pp. 353–360.
- [15] Khajavi, S.H.; Motlagh, N.H.; Jaribion, A.; Werner, L.C.; Holmstrom, J. (2019) Digital Twin: Vision, benefits, boundaries, and creation for buildings, *IEEE Access*, vol. **7**, pp. 147406–147419, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2946515>.
- [16] Sacks, R.; Girolami, M.; Brilakis, I. (2020) Building Information Modelling, Artificial Intelligence and Construction Tech, *Dev. Built Environ.*, vol. **4**, p. 100011, Nov. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100011>.
- [17] Fabrycky, W. (1991) *Life-cycle cost and economic analysis*, Prentice Hall International Series in Industrial and Systems Engineering, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- [18] Wang, L.; Shen, W.; Xie, H.; Neelamkavil, J.; Pardasani, A. (2002) Collaborative conceptual design-state of the art and future trends, *Computer-Aided Design* **34** (13), 981–996.
- [19] Flur, M. (2016) *Kollaborative Modellierung und simulationsgestützte Evaluierung trassenbasierter Infrastrukturbauwerke*, Dissertation TU München.
- [20] BIM4Infra (2019) Teil 6 – Steckbriefe der wichtigsten BIM-Anwendungsfälle, https://bim4infra.de/wp-content/uploads/2019/07/BIM4INFRA2020_AP4_Teil6.pdf (Stand 02.07.21).
- [21] Kraus, W. (2020) *Einführung einer modell- und regelbasierten Qualitäts- und Kollaborationsprüfung mit Solibri Office für die Vollack Gruppe GmbH & Co. KG*, Masterarbeit OTH Regensburg.
- [22] buildingsSMART (2021) *Standards*, <https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards> (Stand 25.04.21).
- [23] Avss, P.; Prasant, S.; Jain, R. (2009) *Virtual prototyping increases productivity – A case study*, 2009 International Symposium on VLSI Design, Automation and Test, pp. 96–101.
- [24] Bordegoni, M.; Rizzi, C. (2011) *Innovation in product design: from CAD to virtual prototyping*, Springer.
- [25] De Schutter, T. (2014) *Better Software. Faster! Best Practices in Virtual Prototyping*. Happy About.
- [26] Wang, G.G. (2002) Definition and review of virtual prototyping, *J. Comput. Inf. Sci. Eng.* **2** (3), pp. 232–236, <https://doi.org/10.1115/1.1526508>.

- [27] Huang, T.; Kong, C.W.; Guo, H.L.; Baldwin, A.; Li, H. (2007) A virtual prototyping system for simulating construction processes, *Autom. Constr.* **16** (5), 576–585, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2006.09.007>.
- [28] Borrmann, W.G.A. (2011) *Digitale Baustelle – innovativer Planen, effizienter Ausführen – Werkzeuge und Methoden für das Bauen im 21. Jahrhundert*, Springer-Verlag.
- [29] Koppelhuber, J. (2017) *Holzbau in der Bauwirtschaft – ein Paradigmenwechsel hin zum Industriellen Bauen*, Tagungsband Forum Holz Bau Urban Köln, pp. 3–12.
- [30] Svilans, T.; Tamke, M.T.; Thomsen, M.R.; Runberger, J.; Strehlke, K.; Antemann, M. (2019) New workflows for digital timber, in *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. **24**, Springer, pp. 93–134.
- [31] Kerber, E.; Heimig, T.; Stumm, S.; Oster, L.; Brell-Cokcan, S.; Reissen, U. (2018) *Towards robotic fabrication in joining of steel*, ISARC 2018 – 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction and International AEC/FM Hackathon: The Future of Building Things, vol. **35**, pp. 1–9, <https://doi.org/10.22260/isarc2018/0062>.
- [32] Ding, K. et al. (2018), *Smart steel bridge construction enabled by BIM and Internet of Things in industry 4.0: A framework*, ICNSC 2018 – 15th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, pp. 1–5, <https://doi.org/10.1109/ICNSC.2018.8361339>.
- [33] Drass, M.; Kraus, M.A.; Stelzer, I. (2021) SOUND-LAB AI-Estimator – Machine Learning for Sound Insulation Value Predictions of various Glass Structures, *Glas. Struct. Eng.*, vol. submitted.
- [34] Kraus, M.; Drass, M. (2020) Künstliche Intelligenz für die Gebäudehülle, *Dtsch. Ingenieurblatt*, no. 4.
- [35] Kraus, M.A.; Drass, M.; Schneider, J. (2021) Anwendungen und Potenziale des Einsatzes von Künstlicher Intelligenz im Bereich von Gebäudehüllen, *Glasbau*.
- [36] Wangler, T.; Roussel, N.; Bos, F.P.; Salet, T.A.M.; Flatt, R.J. (2019) Digital concrete: a review, *Cem. Concr. Res.*, vol. **123**, p. 105780.
- [37] Mechtcherine, V. et al. (2019) Alternative reinforcements for digital concrete construction, in *RILEM Book-series*, **19**, 167–175, https://doi.org/10.1007/978-3-319-99519-9_15.
- [38] Asprone, D.; Menna, C.; Bos, F.P.; Salet, T.A.M.; Mata-Falcón, J.; Kaufmann, W. (2018) Rethinking reinforcement for digital fabrication with concrete, *Cem. Concr. Res.* **112**, 111–121, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.020>.
- [39] Li, H.; Chan, N.K.Y.; Huang, T.; Skitmore, M.; Yang, J. (2012) Virtual prototyping for planning bridge construction, *Autom. Constr.* **27**, 1–10, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.04.009>.
- [40] Stumm, S.; Brell-Cokcan, S.; Feldmann, M. (2019) Robotik im Stahlbau 4.0: Von der digitalen Planung zu Produktion und Bau, in *Stahlbau Kalender 2019* (Hrsg. Kuhlmann, U.), S. 733–778, Ernst & Sohn, Berlin, <https://doi.org/10.1002/9783433609873.ch12>.
- [41] Hack, N. et al. (2020) Structural stay-in-place formwork for robotic in situ fabrication of non-standard concrete structures: A real scale architectural demonstrator, *Autom. Constr.*, **115**, p. 103197, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103197>.
- [42] Hack, N. et al. (2017) *Mesh Mould: An on Site, Robotically Fabricated, Functional Formwork*, National Museum of Qatar, View project Concrete Hinges, Second Concrete Innovation Conference (2nd CIC), vol. **19**, pp. 1–10.
- [43] Goldbeck (2021) <https://www.goldbeck.de/leistungen/planungarchitektur> (Stand 08.04.21).
- [44] Max Bögl (2021) <https://www.maxmodul.de> (Stand 25.03.21).
- [45] BStfWBV, (2019) Seriell, modular und vorgefertigt – die neue Formel für bezahlbares Wohnen? <https://www.stmb.bayern.de/assets/stmi/med/aktuell/wpt2019-programm.pdf> (Stand 01.03.21).
- [46] Bast, S. (2020) *Einflussfaktoren auf das Outsourcing der BIM Management Leistung*, Masterarbeit OTH Regensburg, <https://opus4.kobv.de/opus4-oth-regensburg/frontdoor/index/index/start/0/rows/10/sortfield/score/sortorder/desc/searchtype/simple/query/Bast/docId/639> (Stand 01.02.21).
- [47] Studie: *BIM-Nutzung in der SHK Branche* (2018) <https://www.autocad-magazin.de/studie-bim-nutzung-in-der-shk-branche> (Stand 03.07.21).
- [48] Githens, G. (2007) *Product Lifecycle Management: Driving the Next Generation of Lean Thinking* by Michael Grieves, vol. **24**, no. 3. McGraw Hill Professional.
- [49] Bayerische Bauindustrie, *Building Lab – Bauindustrie Bayern*. <https://www.bauindustrie-bayern.de/building-lab>.