

INTERDISZIPLINÄRE FORSCHUNGSMATRIX ZUR DIGITALISIERUNG IN DER BAUWIRTSCHAFT

AN INTERDISCIPLINARY
RESEARCH MATRIX
FOR DIGITALIZATION
IN THE CONSTRUCTION
INDUSTRY

ABSTRACT

Digitalisierung kann zweifellos als der momentan wichtigste Trend in der Bauwirtschaft betrachtet werden, was sich unter anderem durch unzählige Veröffentlichungen auf diesem Gebiet äußert. Die überwiegende Mehrheit dieser Veröffentlichungen fokussiert auf ein spezielles Thema, gibt jedoch keinen repräsentativen, strukturierten und allgemein verständlichen Überblick über generelle Forschungsthemen im Bereich der Digitalisierung der Bauwirtschaft. Aufbauend auf einer umfangreichen Literaturrecherche wurde in Form einer interdisziplinären und fakultätsübergreifenden Zusammenarbeit zwischen dem Forschungsbereich Business Informatics Group an der Fakultät für Informatik und dem Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik an der Fakultät für Bauingenieurwesen eine Vielzahl aktueller Forschungsdesiderate identifiziert. Diese Forschungsthemen werden gemäß einer aus vier Forschungsfeldern bestehenden Systematik klassifiziert, deren grundlegende Konzepte vorgestellt und die Relevanz für die Bauwirtschaft erläutert. Abstraktion und Datenfluss werden schließlich als zwei Dimensionen einer Forschungsmatrix eingeführt, in die die Forschungsthemen eingeordnet werden. Der vorliegende Artikel verdeutlicht, dass die Digitalisierung der Bauwirtschaft, entgegen der geläufigen Auffassung, über eine papierlose Datenverwaltung hinausgeht und Bedarf an interdisziplinärer und fakultätsübergreifender Forschung besteht.

Digitalization can be regarded as the current most important trend in the construction industry, which is, amongst other things, reflected by a plethora of publications in this field. The majority of these publications focus on a particular topic, but do not offer a representative, structured and generally comprehensible overview of research topics and their interconnectedness. Resulting from the interdisciplinary research cooperation between the Business Informatics Group of the Faculty of Informatics and the Construction Process and Methods Group at the Faculty of Civil Engineering, numerous research topics were identified based on a jointly conducted literature review. These research topics are classified according to a taxonomy consisting of four research fields, whose core concepts are presented and whose relevance is defined for the construction industry. Finally, the dimensions, abstraction and data flow are introduced as two dimensions of an interdisciplinary research matrix in order to assign the research topics. The present article concludes that the digitalization in the construction industry goes beyond mere paperless data management, and thus, there exists the need for an interdisciplinary and interfaculty research program.



Dipl.-Ing. Marco Huymajer studierte Elektrotechnik sowie Mikroelektronik und Photonik an der TU Wien und an der Universidad Politécnica de Madrid. Vor seiner gegenwärtigen Tätigkeit am Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement war er in verschiedenen Unternehmen, am Institut für Mikroelektronik und am Institut für Information Systems Engineering an der TU Wien in der Softwareentwicklung tätig. Sein Forschungsinteresse liegt im Einsatz von Data Science in der Bauwirtschaft.



Dipl.-Ing. Mag.rer.soc.oec. Dr.techn. Alexandra Mazak studierte Data Engineering & Statistics, Wirtschaftsingenieurwesen Informatik und Informatikmanagement an der TU Wien. In ihrer derzeitigen Tätigkeit am Institut für Information Systems Engineering an der TU Wien ist sie operative Leiterin des FFG Innovationslehrgangs zur Digitalen Transformation in der Produktentwicklung und Produktion (DigiTrans 4.0). Als Senior Researcherin leitet Dr. Mazak zudem das Modul Reactive Model Repositories im Christian Doppler Labor für Modellintegrierte intelligente Produktion (CDL-MINT). Ihre Forschungsschwerpunkte liegen in den Bereichen Modell-getriebene System- und Softwareentwicklung, Datenintegration und stochastische Modellierung.

1. EINFÜHRUNG

Die Bauwirtschaft (BW) steht vor großen Herausforderungen, wie beispielsweise die im Vergleich zu anderen Branchen geringe Produktivität. Produktivität ist eine wesentliche Kennzahl zur Beurteilung der Effizienz einzelner Prozesse oder des gesamten Wertschöpfungsprozesses in der BW [1]. Die Mehrheit der Autoren attestiert der BW eine vergleichsweise geringe Produktivität [2, 3] oder zumindest eine unzulängliche zeitliche Entwicklung dieser [4–10]. Medial angeregte Diskussionen über deutliche Kosten- oder Terminüberschreitungen von Großbauprojekten rücken die BW in ein schlechtes Licht.

Ein Blick auf volkswirtschaftliche Zahlen lohnt sich, um die Relevanz zu verdeutlichen, die genannten Herausforderungen der BW in Angriff zu nehmen. Mit einem Beitrag von 6 % bis 9 % zum nominalen Bruttoinlandsprodukt (BIP) lässt sich der BW ein bedeutender Anteil an der Wertschöpfung zu rechnen [5, 11–13]. Gemäß McKinsey & Company [10] ergäbe sich eine zusätzliche Wertschöpfung von 3,3 Billionen Dollar oder eine Steigerung des BIPs von 2 %, gelänge es der BW an Produktivität mit der restlichen Wirtschaft aufzuschließen. Als Arbeitgeber von mehr als 6 % der Arbeitnehmer ist die BW zudem ein entscheidender Faktor für den Arbeitsmarkt [12–14]. Nicht zuletzt ist BW für einen großen Anteil des globalen Ressourcenverbrauchs verantwortlich [9, 15, 16], woraus sich ein hohes Aktionspotential in Bezug auf Umweltschutz ergibt.

Zur Bewältigung der genannten Herausforderungen wurde eine Vielzahl an Maßnahmen vorgeschlagen, die von gesetzlicher Deregulierung bis zur verstärkten Nutzung von Fertigteilen reichen, wobei Digitalisierung und der verstärkte Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) häufig angeführt werden [2, 17–23]. McKinsey & Company [10] attestiert der Digitalisierung und Automatisierung sogar das höchste Produktivitätssteigerungspotential von allen vorgeschlagenen Maßnahmen. Der vorliegende Artikel soll einen strukturierten und allgemein verständlichen Überblick über Forschungsthemen geben, die die Autoren als bedeutsam für die Digitalisierung der Bauwirtschaft erachten.

Der Artikel gliedert sich wie folgt: In Abschnitt 2 werden relevante Begriffe in Bezug auf die Digitalisierung der BW präzisiert. Abschnitt 3 gibt eine strukturierte Auswahl an Forschungsthemen mit Bezug auf die Digitalisierung der BW, erläutert auf allgemein verständliche Weise deren grundlegende Konzepte und verdeutlicht den Bezug zur BW. In Abschnitt 4 werden zwei grundlegende Dimensionen eingeführt, in denen sich alle IKT-Systeme betrachten lassen. Darüber hinaus wird eine Forschungsmatrix präsentiert, die die Einordnung der vorgestellten Forschungsthemen in diese zwei Dimensionen darstellt. Abschnitt 5 fasst die Ergebnisse schließlich zusammen und gibt einen Ausblick.

2. BEGRIFFE

Unter digitalen Daten versteht man Daten, die aus diskreten Werten bestehen und unter digitalen Systemen Systeme, die mit diesen Daten operieren [24]. Da digitale Daten letztendlich immer eine kontinuierliche physikalische Größe repräsentieren, sind digitale Systeme nicht als Gegenteil zu analogen Systemen zu verstehen, sondern als zusätzliche Abstraktion. Der entscheidende Vorteil der Beschränkung eines Kontinuums auf eine diskrete Anzahl von Werten liegt darin, dass diese Systeme bis zu einem gewissen Grad unempfindlich gegenüber externen Störeinflüssen und unvermeidbaren physikalischen Effekten, wie Temperaturschwankungen, Dämpfung, Dispersion, Rauschen, elektromagnetischen Feldern sowie herstellungsbedingten Toleranzen, sind. Unter bestimmten Voraussetzungen lassen sich mit diesen Systemen digitale Daten ohne Informationsverlust speichern und übertragen. Da IKT-Systeme auf der Digitaltechnik aufbauen, wird in diesem Artikel der Begriff „digitales System“ synonym zu „IKT-System“ verwendet. Unter Digitalisierung im engeren Sinn versteht man die Erstellung einer digitalen Darstellung eines physischen Objekts. Als Digitalisierung im weiteren Sinn bezeichnet man die Transformation ganzer Prozesse mithilfe von IKT. Digitale Transformation umfasst jene Veränderungen des menschlichen Lebens, die durch IKT hervorgerufen oder durch diese beeinflusst werden [25]. In einem unternehmerischen Zusammenhang bezeichnet digitale Transformation die Verwendung von IKT, um bedeutende, betriebliche Verbesserungen zu ermöglichen [19].

Wenn nicht anders angegeben, ist in diesem Artikel mit Bauwirtschaft jener Wirtschaftszweig gemeint, der sich mit der Planung, der Herstellung und dem Betrieb von Bauwerken befasst, jedoch nicht mit der Produktion von Baustoffen in der stationären Industrie. Dies entspricht dem Abschnitt „F“ der statistischen Systematik der Wirtschaftszweige der Statistik Austria (ÖNACE) [26] bzw. der Europäischen Union (NACE). Nach Oberndorfer et al. [27] umfasst die Bauwirtschaft als Wissenschaft „die Lehre und Forschung von der wirtschaftlichen Abwicklung von Bauprojekten“.

3. FORSCHUNGSFELDER

Basierend auf einer umfangreichen Literaturrecherche werden im vorliegenden Abschnitt Forschungsthemen mit Relevanz für die Digitalisierung der BW angeführt. Es werden grundlegende Konzepte jedes Themas vorgestellt und die Relevanz für die BW erörtert.

Die Forschungsthemen sind in die drei Forschungsfelder Daten (Abschnitt 3.1), Interaktion (Abschnitt 3.2) und Kommunikation (Abschnitt 3.3) gegliedert. Themen, die sich nicht eindeutig einem der Themenfelder zuordnen lassen, werden als Querschnittsthemen (Abschnitt 3.4) eingeordnet.

3.1 DATEN

3.1.1 Big Data

Die voranschreitende Digitalisierung führt zu einer rasant wachsenden Menge an Daten. Der Begriff Big Data bezeichnet enorm große Datenbestände, deren Speicherung und Verarbeitung sich mit konventionellen Strategien nicht mehr in passabler Zeit bewerkstelligen lassen [28, 29]. Abgesehen von ihrer Größe ist für Big Data kennzeichnend, dass diese oftmals nur schwach strukturiert sind und dass eine Verarbeitung nahe der Echtzeit gefordert wird. Diese charakteristischen Eigenschaften sind es, die im Englischen mit „3V’s“ (volume, variety, velocity) bezeichnet werden. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass jüngere Veröffentlichungen diese Eigenschaften um weitere Merkmale erweitern und deshalb von „4V’s“ oder „5V’s“ sprechen. Bilal et al. [29] unterscheiden zwischen zwei komplementären Teilaspekten von Big Data: Big Data Engineering (BDE) und Big Data Analytics (BDA). BDE bezeichnet die Domäne, die sich mit der Infrastruktur zur Speicherung und Verarbeitung von Daten beschäftigt und in diesem Abschnitt behandelt wird. BDA bezeichnet vorwiegend jene Domäne, die sich mit den Algorithmen zur Analyse der Daten befasst, worauf in Abschnitt 3.1.4 näher eingegangen wird.

Das Weltwirtschaftsforum nennt den Einsatz von Big Data als eine der Maßnahmen im Rahmenplan zur Transformation der BW [9]. Die Praxis zeigt, dass die riesigen Datenmengen, die verstärkt auftretenden unstrukturierten Daten und das Erfordernis einer Verarbeitung der Daten nahe der Echtzeit mit herkömmlichen Techniken nicht bewältigt werden können. Als eine potentielle Quelle für die Datenflut können BIM-orientierte (Building Information Modeling) Ansätze (Abschnitt 3.4.1) und die damit verbundenen detailreichen Gebäudemodelle, der verstärkte Einsatz von elektronischen Geräten (z. B. Mobiltelefone) und die steigende Konnektivität genannt werden. Im Internet der Dinge (Abschnitt 3.3.1) werden zukünftig Sensoren (Abschnitt 3.2.1) und Baumaschinen mit elektronischem Datenzugriff eine gewaltige Menge an Daten produzieren. Multimediale Inhalte wie Ton- und Bildaufnahmen sowie Geoinformationssysteme (GIS) sind weitere Anwendungen, die tendenziell durch eine hohe Datenmenge gekennzeichnet sind. Bedingt durch die lange Nutzungsdauer werden Gebäudeautomationssysteme eine enorme Datenmenge aus der Betriebsphase eines Gebäudes bereitstellen. Die stetig wachsende Datenbasis bietet jedoch die Möglichkeit umfangreicher Analysen, deren manuelle Durchführung oftmals zeit-, kostenintensiv und fehleranfällig ist. Zudem erweisen sich die dafür eingesetzten Softwarewerkzeuge, wie beispielsweise Tabellenkalkulationsprogramme, als ungeeignet, da sie sich nicht ausreichend an komplexere Anforderungen ausrichten lassen. Eine Herausforderung stellt aber nicht nur die Größe der Datenmenge dar, sondern auch der Wunsch nach einer Verarbeitung der Daten in Echtzeit und die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Verfügbarkeit der Daten über den ganzen Lebenszyklus eines Bauwerks. Obgleich einzelne Anwendungen in der BW bekannt sind, lässt ein ausgedehnter Einsatz von Big Data noch auf sich warten [29]. Auf Big Data basierende Technologien bieten die Möglichkeit, die beschriebenen Herausforderungen anzunehmen, indem sie eine Plattform zu Verfügung stellen, große Mengen unstrukturierter Daten, wie sie zukünftig von Baumaschinen und Sensor geliefert

werden, zu speichern und nahe der Echtzeit zu analysieren. Dies liefert die Grundlage einer kontinuierlichen Projektüberwachung sowie die Verknüpfung geometrischer Daten mit Bauzeit, Kosten und Ressourcen. Daten aus der Nutzungsphase eines Gebäudes ermöglichen eine Analyse des gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks.

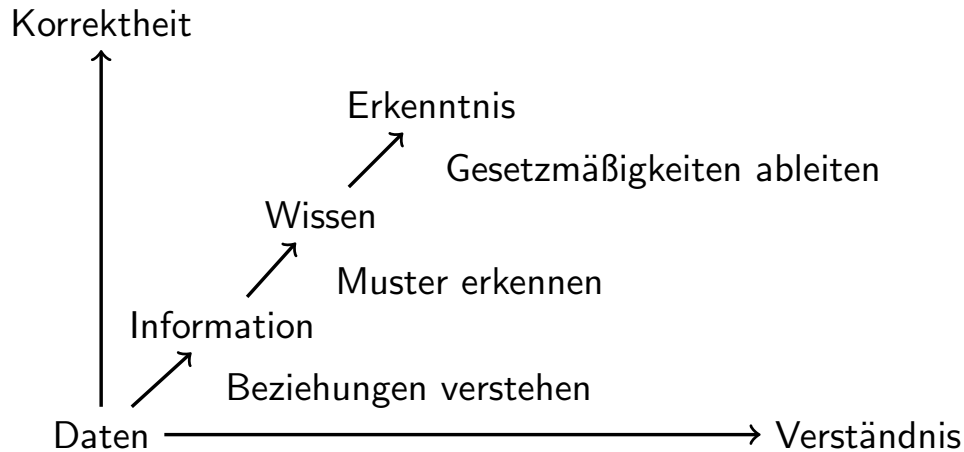


Abb. 1. Daten, Informationen, Wissen und Erkenntnis [31]

Fig. 1. Data, information, knowledge and insight [31]

3.1.2 Wissensmanagement

Wissen lässt sich definieren als „ein für Personen oder Gruppen verfügbarer Bestand von Fakten, Theorien und Regeln [...], die sich durch den größtmöglichen Grad an Gewissheit auszeichnen, so dass von ihrer Gültigkeit bzw. Wahrheit ausgegangen wird“ [30]. Abbildung 1 zeigt den Zusammenhang zwischen Daten, Informationen, Wissen und Erkenntnis. Zentraler Bestandteil der Digitalisierung ist die Nutzbarmachung digitaler Daten durch Verknüpfung vorhandener und neu generierter Daten und deren Erweiterung um semantische Informationen, sodass diese bei einer maschinellen Verarbeitung inhaltlich erschlossen werden können. Es gibt verschiedene Formen der Repräsentation von Wissen, die sich unterschiedlich gut eignen, um die oben genannten Arten von Wissen abzubilden. Jede dieser Formen steht in Zusammenhang mit einer bestimmten Methode der Strukturierung und einer konkreten Datenstruktur [32].

Wissen ist ein nicht zu vernachlässigender Vermögensgegenstand von Unternehmen. Wissen ist in der Regel an unterschiedlichen geographischen Orten vorhanden, auf verschiedene Systeme verteilt und in unterschiedlicher Form in diesen vorhanden. Das Weltwirtschaftsforum nennt einen unzureichenden Wissenstransfer als einen der Gründe für die geringe Produktivität der BW und propagiert Wissensmanagement als eine Maßnahme im Rahmenplan zur Transformation der BW [9]. Rezgui et al. [33] zählen Wissensmanagement zu einem der vorrangigen Themen zur Lösung IKT-relevanter Probleme. Das zur Durchführung von Bauprojekten erforderliche Wissen umfasst

baubetriebliche, bauwirtschaftliche, bauphysikalische, baurechtliche und soziale Aspekte. Ein Teil befindet sich in den Köpfen der Mitarbeiter und ist stark an einzelne Personen gebunden. Bei einer projektorientierten Organisation gelingt es oftmals nicht, Wissen aus vergangenen Projekten zu nutzen. Komplexe und flexible Prozesse, so wie sie in der BW üblich sind, erfordern ein hohes Maß an Flexibilität bei der Dokumentation. Wissen ist dabei an verschiedenen Orten, in unterschiedlichen Systemen, in Form strukturierter und unstrukturierter Daten vorhanden. Letztere sind zwar für Menschen verständlich, jedoch grundsätzlich ungeeignet für eine maschinelle Analyse. Ziel ist es, mit Techniken der Wissensrepräsentation vorhandenes Wissen zu bewahren, zugänglich zu machen und wiederzuverwerten. Dabei soll es möglich sein, Wissen innerbetrieblich, über Abteilungsgrenzen hinausgehend, einem möglichst großen Personenkreis zur Verfügung zu stellen, oder Wissen aus vergangenen Projekten für zukünftige Projekte zu nutzen.

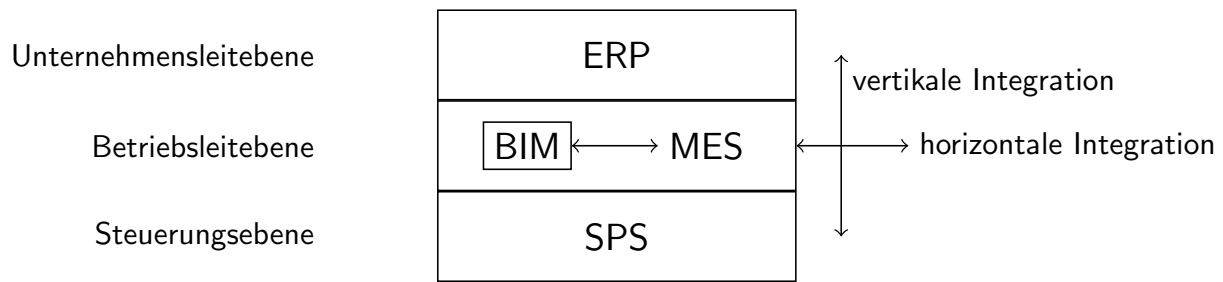


Abb. 2. Horizontale und vertikale Integration

Fig. 2. Horizontal and vertical integration

Letzteres geht über Möglichkeiten hinaus, die heute mit BIM-orientierten Ansätzen erzielt werden können. Da 40 % bis 80 % der Kosten im Betrieb eines Gebäudes anfallen [9], ist es insbesondere für eine Optimierung der Lebenszykluskosten wesentlich, Daten aus der Nutzungsphase in der frühen Planungsphase zukünftiger Bauprojekte zu berücksichtigen. Wissen, das für eine maschinelle Verarbeitung nicht geeignet ist, kann über entsprechende Techniken einer maschinellen Verarbeitung zugänglich gemacht werden. Im Speziellen werden bereits in digitaler Form vorhandene Daten um semantische Informationen erweitert und zu einander in Beziehung gesetzt.

3.1.3 Datenintegration

Unter Datenintegration versteht man die Zusammenführung multimodaler Daten oder Daten aus heterogenen Datenquellen in einen einheitlichen Datenbestand. Bestehende Datenquellen können aus maschinenlesbaren Daten wie Dateien von Tabellenkalkulationsprogrammen, Daten, die über Web-Services abgerufen werden oder nicht-maschinenlesbaren Daten, wie handschriftlichen

Dokumenten, bestehen. Davon abhängig ergibt sich die Möglichkeit einer maschinenunterstützten Datenintegration oder einer händischen Eingabe. Die Herausforderung dabei ist die Wahrung von Konsistenz bei fehlenden oder redundanten Daten. Wie in Abb. 2 dargestellt, lässt sich Datenintegration unter anderem in vertikale und horizontale Integration unterscheiden. Erstere bezeichnet eine Integration über verschiedene innerbetriebliche Ebenen hinweg, wohingegen letztere eine Integration innerhalb einer Ebene und entlang der Wertschöpfungskette darstellt.

Das Weltwirtschaftsforum nennt den verstärkten Datenaustausch und die industrieübergreifende Zusammenarbeit (Abschnitt 3.3.2) als eine der Maßnahmen im Rahmenplan zur Transformation der BW [9]. Beim Umgang mit Daten von Bauprojekten kommt es jedoch derzeit an verschiedenen Schnittstellen zu Unterbrechungen des durchgehenden Datenflusses. Während der Ausführung kommt es oftmals zu manuellen Doppeleingaben [34], die zeitaufwendig und fehleranfällig sind und damit zu Inkonsistenzen im Datenbestand führen. Nur 10,7 % der Unternehmen in der BW machen von einem elektronischen Informationsaustausch im Rahmen des Supply-Chain-Managements Gebrauch und nur 6,5 % von strukturierten elektronischen Rechnungen im Zuge der Rechnungslegung [35]. Der schon in der produzierenden Industrie beobachtete Spalt zwischen der Unternehmensebene und der Feldebene (engl. Shop-floor-Ebene) findet sich in analoger Form in der BW zwischen operativen und administrativen Abteilungen wieder. In der Bauausführung wird die Steuerungsebene durch Messgeräte, Sensoren (Abschnitt 3.2.1) und Baumaschinen dargestellt, deren Daten über Telematikportale zugänglich gemacht werden. Diese Daten sind oftmals für eine maschinelle Verarbeitung nicht geeignet, wodurch es bei den unteren Ebenen ebenfalls zu einer Unterbrechung des Datenflusses kommt. Der damit verbundene zeitliche Versatz zwischen Entstehung und Verfügbarkeit der Daten verhindert eine schnelle Reaktion auf auftretende Probleme. Darüber hinaus sind diese Daten oftmals über eine Vielzahl unterschiedlicher Orte, Gewerke, Projektbeteiligte und Systeme verteilt und bestehen sowohl aus strukturierten als auch unstrukturierten Daten; dies erschwert eine maschinelle Analyse (Abschnitt 3.1.4). Nur 27 % der von KPMG befragten Führungskräfte von Unternehmen in der BW geben an, die Möglichkeit eines integrierten Zugriffs auf Projektdaten in Echtzeit zu haben [36]. Als mögliche Ursachen für die Unterbrechung des Datenflusses und die Inhomogenität der Daten können genannt werden: (i) die hohe Komplexität von Bauprozessen, (ii) die große Anzahl involvierter Akteure [37], (iii) der Umstand, dass die Planung, Bauausführung sowie Betrieb und Administration an geographisch getrennten Orten stattfindet und schließlich (iv) der Umstand, dass durch unterschiedliche vertragliche Vereinbarungen Transparenz nicht immer gewünscht und möglich ist [38]. Die Nutzung BIM-basierter Ansätze (Abschnitt 3.4.1) entschärft diese Situation nur für eine gewisse Teilmenge der Daten, indem sie einen homogenen Datenbestand mit oftmals standardisierten Zugriffsmöglichkeiten gewährleisten. Das Ziel von Forschungsprojekten soll es sein, einen durchgängigen industrieübergreifenden Datenfluss über die gesamte Wertschöpfungskette bei Bauprojekten zu ermöglichen und durch vertikale und horizontale Datenintegration eine gesamtheitliche Sicht auf die Daten zu schaffen, die eine nachfolgende Analyse ermöglicht. Insbesondere soll eine Verbindung zwischen BIM-basierten Technologien und Systemen auf anderen Ebenen, wie ERP-, PDM-Systemen (Produktdatenmanagement) etc., geschaffen werden [22].

3.1.4 Datenanalyse und maschinelles Lernen

Das öffentliche Interesse und die Erwartungen an die Technologie des maschinellen Lernens sind momentan enorm [39]. Maschinelles Lernen stellt neben zahlreichen anderen Techniken, wie wissensbasierten Systemen, natürlicher Sprachverarbeitung (engl. Natural Language Processing) etc. einen Spezialfall künstlicher Intelligenz dar [29, 40]. Ein Zusammenhang mit Abschnitt 3.1 besteht insofern, als maschinelles Lernen als eine Form von so genanntem Big Data Analytics (BDA) aufgefasst werden kann. Methoden des maschinellen Lernens erlauben es, automatisiert Muster in Eingabedaten zu erkennen (unüberwachtes Lernen) oder, anhand bekannter Zusammenhänge zwischen Eingangs- und Ausgangsdaten, Aussagen über neue Eingangsdaten zu treffen (überwachtes Lernen) [41–43]. Process Mining (PM) ist eine zwischen maschinellem Lernen und Data-Mining einerseits und Prozessmodellierung und -analyse andererseits angesiedelte Technik. Die zugrundeliegende Idee besteht darin, Wissen aus Eventlogs (Ereignisprotokollen) zu extrahieren, um Prozessmodelle aus realen Prozessen abzuleiten oder diese zu überwachen oder zu optimieren [44].

Die zunehmende Digitalisierung in allen Branchen stellt eine immer breiter werdende Datenbasis zur Verfügung, die zwar die Möglichkeit einer eingehenden Analyse bietet, deren manuelle Verarbeitung sich jedoch zu zeitintensiv gestaltet. Zudem kommen gegenwärtig für eine Analyse der Daten überwiegend Softwarewerkzeuge wie Tabellenkalkulationsprogramme zum Einsatz, die für komplexe Analyseprozesse oder anspruchsvollere Algorithmen ungeeignet sind. Dies deckt sich mit einer Umfrage von KPMG [36], die festgestellt hat, dass derzeit nur 36 % der Befragten ausgefeilte Datenanalyseverfahren einsetzen, um eine projektspezifische Prognose oder Leistungsüberwachung durchzuführen. Maschinelle Lernverfahren können beispielsweise dazu genutzt werden, vorhandene Daten einer eingehenden Analyse zu unterziehen mit dem Ziel einer anschließenden Optimierung von Bauprozessen und Bauverfahren. Die Prozesse großer Bauvorhaben sind hochkomplex, dennoch mangelt es oftmals an deren Formalisierung und konsistenten Ausführung [9]. Die derzeit verwendeten Softwarewerkzeuge bieten nicht die notwendige Funktionalität, um Prozesse eingehend zu analysieren. Durch die Auswertung von Eventlogs verfolgt PM eine prozessorientierte Vorgehensweise. Weitere Forschung ist notwendig, um mithilfe von PM eine integrale Betrachtung eines Bauprojektes in allen drei Phasen anzustellen [45].

3.2 INTERAKTION

3.2.1 Sensorik

Unter einem Sensor im weiteren Sinn versteht man ein System mit der Fähigkeit, eine physikalische Messgröße qualitativ oder quantitativ zu bestimmen. Die Messgröße kann dabei auch beispielsweise durch die Anwesenheit einer Substanz oder deren chemische Eigenschaften beeinflusst werden.

Der Unterschied zu einem klassischen Messgerät ist dabei fließend. Sensoren bezeichnen jedoch verstärkt miniaturisierte Geräte, die für einen automatisierten Datenabgriff konzipiert sind. Unter einem Sensor im engeren Sinn versteht man ein Mikrosystem, das eine physikalische Größe in ein elektrisches oder digitales Signal wandelt. In der Regel lässt sich die physikalische Messgröße nicht direkt bestimmen, sondern muss über den Umweg einer Zwischengröße in ein elektrisches Signal gewandelt werden, das von einem Analog-Digital-Wandler (A/D-Wandler) schließlich in ein digitales Signal umgesetzt wird. Ein Controller gibt die Möglichkeit, diese Daten aufzubereiten, zu speichern und sie z. B. über ein Feldbussystem oder mittels eines drahtlosen Übertragungsverfahrens zur Verfügung zu stellen. Die beschriebene Funktionsweise ist in Abb. 3 schematisch dargestellt. Die Möglichkeit, mit Sensoren die Umwelt in Form digitaler Daten zu erfassen, lässt ihnen eine Schlüsselposition bei der Digitalisierung zukommen. Wie Abb. 6 zu entnehmen ist, stehen sie dabei am Anfang eines langen Datenflusses. Sie liefern die notwendigen Informationen, um Maschinen autonom arbeiten zu lassen oder Menschen Einblicke in komplexe Systeme zu geben.

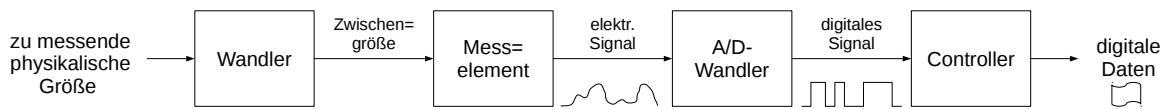


Abb. 3. Vereinfachte Funktionsweise eines typischen Sensors

Fig. 3. Simplified operating principle of a typical sensor

Fortschritte in der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik führen zu einer laufenden Miniaturisierung, Kostenreduktion, Steigerung der Qualität und dazu, dass sich neue Messgrößen erfassen lassen und dadurch Sensoren für neue Anwendungsbereiche verfügbar gemacht werden.

Im Gegensatz zur produzierenden Industrie, bei der Produktionsanlagen in einem Industrie-4.0-basierten Ansatz kontinuierlich eine Fülle an Daten zur Verfügung stellen, die sowohl bei der laufenden Produktion als auch in einer nachfolgenden Optimierung Verwendung finden, wird in der BW gegenwärtig ein Großteil der Daten noch immer manuell erhoben. Der damit verbundene Arbeitsaufwand führt dazu, dass nur die gesetzlich, vertraglich oder baubetrieblich unbedingt notwendige Anzahl an Messungen durchgeführt wird. Oftmals beschränken sich manuelle Messungen lediglich auf subjektive oder qualitative Beobachtungen, die für eine spätere Analyse oftmals unzulänglich sind. Als Ursache der geringen Produktivität in der BW wird unter anderem unzureichende Projektüberwachung gesehen [9], die sich mit dem Einsatz von Sensoren bewältigen lässt. Zum Beispiel ermöglichen Laserscanner, Abweichungen in der Bauausführung zu erkennen und digitale Modelle bestehender Gebäude zu erstellen [2]. Echtzeit-Lokalisierungssysteme (engl. Real-Time Locating

Systems, RTLS) sind eine spezielle Art von Sensoren mit der Fähigkeit, die Position eines Objektes innerhalb eines bestimmten Gebietes in Echtzeit zu ermitteln [46]. Anwendungsmöglichkeiten liegen dabei in der Überwachung der Position von Personen, Material und Maschinen. Derzeit setzen lediglich 17 % der Unternehmen der BW Sensoren zur Standortbestimmung von Bauarbeitern ein [36], nur 10,2 % verwenden RFID-Technologien (Radio-Frequency Identification) zur Identifizierung von Objekten [35]. Durch die Verwendung von Echtzeit-Lokalisierung von Ressourcen konnte eine Senkung der Baukosten von 10 % beobachtet werden [9]. Es wird davon ausgegangen, dass bis 2022 eine Billion Sensoren über das Internet erreichbar sein werden [47]. Es gilt, diesen Trend für die BW vorteilhaft zu nutzen. Die automatisierte Erfassung von Messgrößen mithilfe von Sensoren birgt ein enormes Potential an Zeit- und Kostenersparnis. Dadurch lassen sich Messungen in kürzeren Intervallen durchführen oder Größen erfassen, die andernfalls unberücksichtigt bleiben. Diese zusätzlichen Daten haben einen hohen Nutzen beim Überwachen des Projektfortschritts, bei der Dokumentation, bei der Qualitätssicherung und einer nachfolgenden Analyse hinsichtlich der Optimierung von Prozessen.

3.2.2 Aktorik, Robotik und additive Bauweise

Aktoren oder Aktuatoren sind Systeme, die ein elektrisches Signal in eine physikalische Größe umwandeln und sind damit das Gegenstück der in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Sensoren. Sensoren und Aktoren stellen Sonderfälle der Transducer dar, womit man Systeme bezeichnet, die ganz allgemein Energie einer Form in eine andere Form umsetzen [48]. Ein Roboter ist ein Gerät, das seine Umwelt wahrnehmen, gezielt darauf reagieren und autonom nutzbringende Arbeit verrichten kann [49]. In der Robotik werden Aktoren auch als Effektoren bezeichnet [50]. Mithilfe von Sensoren können Roboter ihre Umwelt wahrnehmen. Aktoren erlauben es ihnen, sich fortzubewegen und ihre Umwelt zu beeinflussen. Exoskelette sind tragbare Roboter, die die Flexibilität und Intelligenz von Menschen mit der Geschwindigkeit und Kraft von Menschen kombinieren [51].

Es wird geschätzt, dass weltweit derzeit 1,5 bis 1,75 Millionen Roboter eingesetzt werden und dass diese Zahl bis 2025 auf 4 bis 6 Millionen steigen wird [52]. Die Anzahl der Roboter je tausend Beschäftigten in der BW wird mit weniger als 0,1 beziffert [53]. Im Vergleich dazu verrichten 80 Roboter je tausend Beschäftigte beim Spitzenreiter, der Automobilindustrie, 80 % der zur Herstellung eines Kraftfahrzeuges notwendigen Arbeit [47]. So genannte semiautonome Baumaschinen sind Maschinen, die in der Lage sind, komplexe Bautätigkeiten durchzuführen, dabei jedoch auf menschliche Steuerung angewiesen sind [9]. Diese Technologie deckt sich weitgehend mit jener, die als Automated Machine Guidance (AMG) tituiert wird [54]. Autonome Baumaschinen können als spezielle Form von Robotern aufgefasst werden, die sich Digitaltechnik zu Nutze machen, um Bautätigkeiten selbstständig durchzuführen und dabei nur mehr einer menschlichen Überwachung bedürfen. Dies wird auch als Automated Machine Control (AMC) bezeichnet. Der Einsatz derartiger Maschinen verspricht eine Reihe von Vorteilen, wie Kostenersparnis durch die Erhöhung der Arbeitsproduktivität, Verbesserung der Qualität durch die höhere Genauigkeit und Reduktion menschlicher Fehler sowie die Erhöhung der Arbeitssicherheit durch das Fernhalten von Arbeitskräften aus Gefahrenzonen.

Das Weltwirtschaftsforum nennt den Einsatz autonomer oder semiautonomer Baumaschinen als eine der Maßnahmen im Rahmenplan zur Transformation der BW [9]. Ein Verfahren, bei dem eine spezielle Art von Robotern zum Einsatz kommt, ist die additive Bauweise, auch 3D-Druck genannt. Die additive Bauweise lässt sich als Prozess beschreiben, bei dem, auf einem 3D-Modell basierend, Baustoffe zu einem Gebäude zusammengefügt werden [55]. Der Begriff ähnelt dem der additiven Fertigung, bei der aber Objekte kleineren Maßstabs gefertigt werden, die keine Bauwerke darstellen. Bei dieser Art der Bauweise wird ein softwareunterstützt erstelltes 3D-Modell durch einen Algorithmus in Schnitte zerlegt und anschließend durch schichtweises Auftragen oder Zusammensetzen realisiert. Als Vorteile der additiven Bauweise gegenüber anderen Bauverfahren sind zu nennen: (i) die Erstellung von vielfältigen Formen zu ermöglichen (ii) die Produktivität zu steigern und (iii) Abfälle zu reduzieren [9].

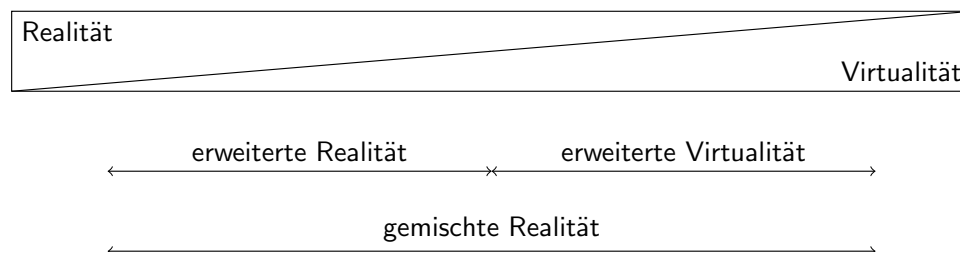


Abb. 4. Gemischte Realität als Kontinuum zwischen Realität und Virtualität

Fig. 4. Mixed reality as continuum between reality and virtuality

3.2.3 Visualisierung, virtuelle und gemischte Realität

Unter Visualisierung versteht man die graphische Darstellung von Daten oder Begriffen [56]. Der Nutzen, Daten zu visualisieren besteht in der enormen Menge an Informationen, die Menschen in kurzer Zeit in dieser Form erfassen können. In einer gesamtheitlichen Sichtweise folgt beim Visualisierungsprozess dem Sammeln und Speichern (Abschnitte 3.1.1, 3.1.2 und 3.2.1) und dem Vorverarbeiten (Abschnitt 3.1.4) der Daten die eigentlich visuelle Darstellung mittels Hard- und Software. Als virtuelle Realität wird die „Darstellung und gleichzeitige Wahrnehmung der Wirklichkeit und ihrer physikalischen Eigenschaften in einer in Echtzeit computergenerierten, interaktiven virtuellen Umgebung bezeichnet“ [30]. Im Kontinuum zwischen Realität und virtueller Realität, der so genannten gemischten Realität, ergibt sich die Möglichkeit, die Realität um virtuelle Aspekte zu erweitern (erweiterte Realität), oder eine virtuelle Darstellung um reelle Aspekte zu erweitern (erweiterte Virtualität) [57], wie in Abb. 4 graphisch dargestellt. Obwohl der visuellen Wahrnehmung bis jetzt die größte Aufmerksamkeit geschenkt wurde, beziehen sich die Begriffe der virtuellen und gemischten Realität gleichermaßen auf den Hör-, Tast- und Geruchssinn. Damit stellt dieses Thema einen Spezialfall des in Abschnitt 3.2.3 beschriebenen Themas dar.

BIM-orientierte Ansätze, und das damit verbundene Konzept eines dreidimensionalen Gebäude-modells, erfreuen sich steigender Beliebtheit. Trotz der eingeschränkten Möglichkeiten bei der Darstellung und beim Umgang mit Daten, wird zur Visualisierung oftmals auf Softwarewerkzeuge wie Tabellenkalkulationsprogramme zurückgegriffen. Sie bieten keine Funktionalität zur geometrischen Darstellung und zum direkten Datenzugriff auf Gebäudemodelle. Ebenso sind diese Werkzeuge ungeeignet, um mit großen Mengen an Daten oder komplexeren Formen der Benutzerinteraktion umzugehen. Darüber hinaus beschränkt sich die Visualisierung von Geometrien derzeit fast ausschließlich auf Schnitte oder Projektionen in eine Ebene, die auf Computermonitoren oder Papier dargestellt werden. Diese Arten der Darstellung sind inhärent mit einem Informationsverlust verbunden und schlecht angepasst an die menschliche Wahrnehmung. Häufig finden auch maßstabsgetreue Modelle Verwendung, die jedoch nur einen geringen Detaillierungsgrad zulassen, deren Herstellung aufwendig ist und die sich nur schwierig konsistent mit zukünftigen Planungs-, Bau- und Betriebsphasen halten lassen. Elaboriertere Visualisierungstechniken sollen zukünftig direkt Daten eines BIM-Modells darstellen können. Sie sollen auch dazu geeignet sein, mit der Flut von Daten umzugehen, die sich aus dem zukünftig verstärkten Einsatz von Sensoren ergeben wird. Durch eine interaktive Funktionsweise soll die Visualisierung dem Benutzer auch bei einer großen Menge an Daten wesentliche Einblicke ermöglichen. Virtuelle Realität schafft die Möglichkeit, bereits während der Planung einen realitätsnahen und interaktiven Eindruck eines Gebäudes zu vermitteln. In der Bauphase kann die erweiterte Realität Bauplaner und Bauarbeiter bei ihrer Tätigkeit unterstützen, indem dem Gebäude virtuelle Aspekte, wie beispielsweise Daten baubetrieblicher Prozesse oder deren Ergebnisse, überlagert werden. Auf gleiche Weise können in der Betriebsphase zukünftige Änderungen an einem Gebäude visualisiert werden. Die für diese Art der Darstellung notwendigen Daten werden automatisch aus dem Gebäudemodell extrahiert und sind in allen Phasen mit diesem konsistent.

3.3 KOMMUNIKATION

3.3.1 Internet of Things

Unter Internet of Things (IoT), deutsch Internet der Dinge (IdD), versteht man ein Internet der nächsten Generation, das über jetzige Informations- und Kommunikationstechnologie hinausgehend nicht nur Menschen, sondern auch Objekte vernetzt [58]. Dass diese Vision bereits Realität geworden ist, zeigt die Tatsache, dass bereits im Jahre 2011 die Anzahl der mit dem Internet verbundenen Objekte jene von Personen überstiegen hat. Bei IoT entstehen Netzwerke von Objekten, die autonom miteinander kommunizieren und mit ihrer Umwelt interagieren. Eine Eigenschaft, die typischerweise auf IoT-Systeme zutrifft ist, dass sie große Datenmengen produzieren, die eine Verarbeitung nahe der Echtzeit erfordert [59]. Im Gegensatz zum Großteil der klassischen IT-Infrastruktur werden IoT-Objekte oftmals von mehreren Subjekten betrieben, weshalb man sich häufig

offener Standards bedient. Damit geht aber auch die Anforderung von derartigen Systemen nach bestimmten Sicherheitsmaßnahmen einher. IoT-Systeme bestehen typischerweise aus (i) Hardware zur Identifikation, Messung (Abschnitt 3.2.1) oder Beeinflussung (Abschnitt 3.2.2) einer physikalischen Größe sowie einer Komponente zur Datenübertragung, (ii) einer Middleware zur Verarbeitung und Speicherung der Daten und schließlich (iii) einer Möglichkeit der Visualisierung der Daten und Ergebnisse (Abschnitt 3.2.3). Der Zusammenhang mit vielen der anderen Forschungsthemen verdeutlicht den interdisziplinären Charakter dieses Themas. Schätzungen zufolge werden bis 2020 50 Milliarden Geräte mit dem Internet verbunden sein [47]. Dieser Trend wird durch die rasante Weiterentwicklung im Bereich der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik getrieben. Bei einer intelligenten Baustelle (engl. Smart Construction Site) werden Arbeiter, Geräte und Material kontinuierlich überwacht und die gesammelten Daten nahe der Echtzeit ausgewertet, um Pläne aktuell zu halten, bevorstehende Arbeitsschritte zu simulieren und Konflikte vorzubeugen [54]. In Smart Buildings verbindet IoT Sensoren (Abschnitt 3.2.1) mit Datenspeichern (Abschnitt 3.1.1) und ermöglicht einen 20 % bis 40 % geringeren Energiebedarf im Betrieb eines Gebäudes und einen höheren Benutzerkomfort durch die Verbesserung der Beleuchtung und Klimatechnik [9].

3.3.2 Kollaboration

Kollaboration ist in diesem Zusammenhang als abteilungs- und unternehmensübergreifende Zusammenarbeit einer Gruppe von Personen zu verstehen. Die Zusammenarbeit kann mit der Erfüllung von Anforderungen, mit einer arbeitsteiligen Arbeitsweise oder der Berücksichtigung unterschiedlicher Fähigkeiten innerhalb einer Gruppe begründet werden [60]. Computer Supported Cooperative Work (CSCW) bezeichnet das Forschungsgebiet, das sich mit dem Verständnis der Teamarbeit und der systematischen Unterstützung der Gruppenarbeit durch IKT beschäftigt [61]. Für CSCW sind die drei Aspekte Kommunikation, Teilen von Informationen und Koordination von Bedeutung [62]. Da Informationen in Form von Daten vorliegen, besteht ein enger Zusammenhang mit Abschnitt 3.1. Es steht eine Fülle verschiedenartiger Softwarewerkzeuge zur Verfügung, die diese Teilaspekte unterschiedlich stark unterstützen. Gemeinsam ist den Softwarewerkzeugen, dass die Zusammenarbeit einer Gruppe entweder durch die Verwendung eines gemeinsamen Systems oder mehrerer untereinander interoperabler Systeme (Abschnitt 3.3.3) erreicht wird. Ein gängiger Mechanismus der Zusammenarbeit besteht darin, ein Dateisystem oder eine Objektdatenbank über ein Netzwerkprotokoll gemeinsam zu benutzen. Die in der Softwareentwicklung üblichen Repositories oder die zur Handhabung von BIM-Daten konzipierten Modellserver sind Beispiele für solche Objektdatenbanken. Content-Management-System (CMS) ermöglicht die Erfassung, Verwaltung, Speicherung, Bewahrung und Bereitstellung von Inhalten und Dokumenten [30]. Oft werden Systeme mit diesem Begriff bezeichnet, bei denen diese Inhalte ausschließlich aus Webseiten bestehen. Enterprise-Content-Management-Systeme (ECM) sind Systeme, die sich CMS zu Nutze machen, um Unternehmen bei organisatorischen Prozessen zu unterstützen. ECMs führen strukturierte, schwach strukturierte und unstrukturierte Informationen zusammen. Als Document Management System (DMS), dt. Dokumentenverwaltungssystem, im engeren Sinn kann die Teilkomponente eines ECM-Systems aufgefasst werden, die zur Erfassung, Verwaltung und Speicherung von Dateien

dient. Die genannten Systeme lassen sich allesamt als spezielle Form von Wissensmanagementsystemen auffassen, wobei dieses Wissen aber oftmals nur teilweise in einer maschinenlesbaren Semantik vorliegt (Abschnitt 3.1.2). Die klassische Kernfunktionalität einer Groupware ist der Versand und die Verwaltung von E-Mails, die Bereitstellung einer Kalenderfunktionalität, die Verwaltung von Notizen und die Unterstützung beim Projektmanagement. Der zumeist auf mobile Endgeräte ausgerichtete Nachrichtensofortversand (engl. Instant Messaging, IM), ist ein jüngeres Instrument der Unternehmenskommunikation. Ein Workflow-Management-System (WFMS) ist ein Softwarepaket zur Unterstützung des Entwurfes und der Ausführung von Geschäftsprozessen [61]. Modellierte Geschäftsprozesse beinhalten die richtige Kombination der abzuarbeitenden Prozessschritte mit den entsprechenden Ressourcen und den dafür benötigten Anwendungen und Daten. Im Gegensatz zu den meisten anderen erwähnten Systemen zielen WFMS auf eine sehr strukturierte Form der Zusammenarbeit in unternehmensweiten Prozessen ab. Ein so genanntes Adaptive Case Management System (ACMS) gibt eine Alternative für wissensintensive Tätigkeiten, die einen flexibleren Arbeitsfluss erfordern [63], wie dies häufig bei Bauprozessen der Fall ist [64].

Angesichts der Komplexität von Bauprozessen kommt es nur in einem unzureichenden Maß zu einer Zusammenarbeit der Akteure bei Bauprojekten [9]. IKT-Systeme bieten nur im geringen Umfang die entsprechende Funktionalität, um die Akteure dabei zu unterstützen. Insbesondere trifft das auf eine über ein Gebäudemodell hinausgehende Zusammenarbeit zwischen unterschiedlichen Gruppen von Akteuren zu, wie z. B. zwischen operativen und administrativen Abteilungen innerhalb eines Bauunternehmens, zwischen dem Bauunternehmen und den Lieferanten oder dem Bauunternehmen und dem Auftraggeber. Durch mangelhafte Unterstützung bei der Kommunikation kommt es oftmals zu einer Totzeit beim Informationsaustausch und damit zu einem verzögerten Beschluss von Maßnahmen. Bei einer Untersuchung über die Produktivität in der BW identifizierten Fulford et al. [20] anhand einer Fallstudie in drei großen Bauunternehmen für die Kollaboration hinderliche Faktoren. Die Autoren kommen zum Schluss, dass ein größeres Maß an Zusammenarbeit in der BW notwendig ist und dass ein verstärkter Einsatz von IKT ohne übermäßigen Mehraufwand die Zusammenarbeit steigern kann. Für eine effiziente Ausführung von Bauprojekten ist ein verlustfreier Austausch der projektbezogenen Informationen mit einer Zugriffsmöglichkeit für alle Beteiligten notwendig. Ein Common Data Environment (CDE) [65] oder ein virtueller Projektraum [17] sind Systeme, die dies ermöglichen. Durch eine nahtlose Zusammenarbeit aller Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette kann die Vernetzung und Synchronisation bislang voneinander getrennter Aktivitäten erfolgen.

3.3.3 Interoperabilität und Standardisierung

Interoperabilität ist die *„Fähigkeit unabhängiger, heterogener Systeme, möglichst nahtlos zusammenzuarbeiten, um Informationen auf effiziente und verwertbare Art und Weise auszutauschen bzw. dem Benutzer zur Verfügung zu stellen, ohne dass dazu gesonderte Absprachen zwischen den Systemen notwendig sind“* [30]. Bei der bilateralen Interoperabilität beschränkt sich diese Fähigkeit nur auf Paare von Instanzen, bei der multilateralen Interoperabilität jedoch auf mehrere

Instanzen (Abb. 5). Thematisch überschneidet sich dieser Aspekt damit stark mit der in Abschnitt 3.3.2 behandelten Thematik. Im Vergleich zum genannten Abschnitt, der vor allem die Zusammenarbeit zwischen Menschen behandelt, liegt der Schwerpunkt in diesem Abschnitt jedoch auf dem Zusammenspiel zwischen IKT-Systemen. Zur Erzielung von Interoperabilität zwischen einem oder mehreren Systemen müssen die Zusammenarbeit und der Informationsaustausch auf eine zuvor vereinbarte Art und Weise erfolgen, die in einem Standard definiert ist. Ein Standard, der von einer Non-Profit-Organisation gemeinschaftlich entwickelt wird, frei zugänglich ist, dessen Schutzrechte lizenzgebührenfrei zugänglich gemacht werden und dessen Verwertung keinerlei Einschränkungen unterliegt, wird als offener Standard bezeichnet [66]. Standardisierung findet auf allen in Abschnitt 2 vorgestellten Abstraktionsebenen statt. Auf einer physikalischen Ebene betrifft dies beispielsweise die mechanische Beschaffenheit von Steckverbindungen und die elektrischen Signaleigenschaften, auf höheren Ebenen die Art der Codierung oder Darstellung von Daten. Aus informatischer Sicht unterscheidet man zwei wesentliche Teilaspekte der Standardisierung: die Standardisierung von Daten und die Standardisierung von Prozessen. Ein Standard erstere betreffend wird meistens Datenformat genannt. Protokolle sind in der Telekommunikation übliche Standards, die meist beide Teilaspekte betreffen. In Hinblick auf die Softwareentwicklung ist die Standardisierung von Programmierschnittstellen (engl. Application Programming Interface, API) von Relevanz.

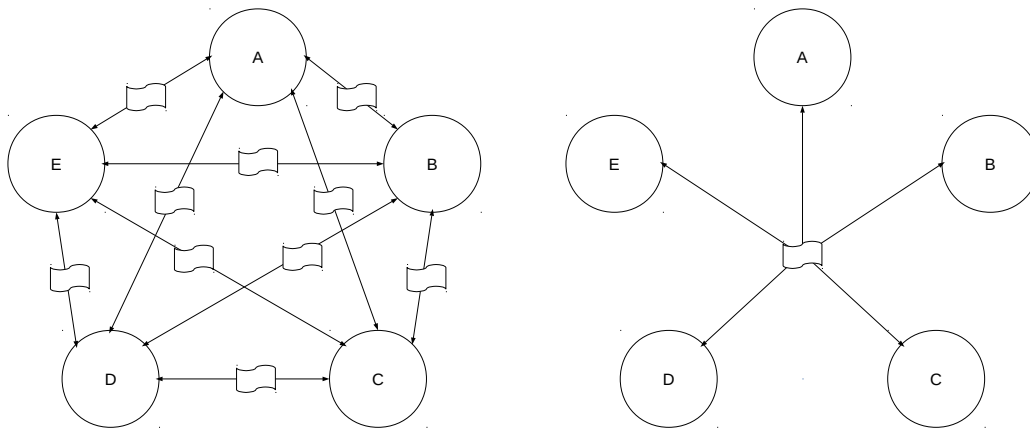


Abb. 5. Bilaterale (linke Seite) und multilaterale (rechte Seite) Interoperabilität [66]

Fig. 5. Bilateral (left panel) and multilateral (right panel) interoperability [66]

Obwohl industrieweiten Standards für die BW eine hohe Bedeutung beigemessen wird, fehlen diese auf einer globalen Ebene noch weitgehend [9]. Die Notwendigkeit der Interoperabilität lässt sich zum einen damit begründen, dass es, im Zuge der Planung, der Bauausführung und des Betriebes zu einer starken Interaktion zwischen den beteiligten Unternehmen kommt. Um diese Interaktion effizient zu gestalten, ist eine standardisierte Form des Datenaustauschs unbedingt erforderlich. Zum anderen verlangt der lange Lebenszyklus von Bauwerken nach einer gewissen Flexibilität in der Wahl von interoperablen Softwarewerkzeugen. Adriaanse et al. [38] nennen Interoperabilität als eine der Barrieren für die Verwendung organisationsübergreifender IKT-Anwendungen. Baube-

trieblich sind Standards beispielsweise für die Kommunikation mit (semi)autonomen Baumaschinen notwendig (Abschnitt 3.2.2) [9].

3.4 QUERSCHNITTSTHEMEN

3.4.1 Modellierung, BIM und Simulation

Ein Modell ist eine vereinfachte oder unvollständige Repräsentation der Wirklichkeit, die mit dem Ziel erstellt wird, eine gewisse Aufgabe zu bewältigen oder Übereinkunft bei einem Thema zu erreichen [67]. Unter einem Prozessmodell versteht man eine formale, meist graphische Darstellung eines Geschäftsprozesses. Diese Art von Modell kann beispielsweise als Grundlage für eine Prozessoptimierung einer Dokumentation oder als formale Spezifikation für ein IKT-System dienen. Als nennenswerte Standards sind die Business Process Model and Notation (BPMN), die Unified Modeling Language (UML), ereignisgesteuerte Prozessketten (EPK) und Petri-Netze zu nennen [68].

Datenmodellierung hat zum Ziel, die Datenstruktur eines IKT-Systems zu beschreiben und kann als ein Teilaspekt der modellgetriebenen Softwareentwicklung gesehen werden. Als zwei verbreitete Standards zur Datenmodellierung seien an dieser Stelle das Entity-Relationship-Modell (ERM) und UML angeführt [69]. Datenmodellierung kann auf einer konzeptionellen, logischen oder physikalischen Ebene erfolgen. Ein Domänenmodell ist ein konzeptionelles Modell, das die verschiedenen Objekte, deren Attribute, Rollen und Beziehungen untereinander sowie Einschränkung und Interaktionen einer speziellen Problemdomäne beschreibt [67]. Ein Datenmodell bildet zusammen mit dem Prozessmodell zwei wesentliche Artefakte des Domänenmodells, das sowohl das Verhalten als auch die Datenstruktur eines Systems abbildet.

Building Information Modeling (BIM) hat in den letzten Jahren ein enormes Ausmaß an wissenschaftlicher Forschung und Entwicklungsaufwand seitens der Softwarehersteller erfahren. Dieser Umstand spiegelt sich in der Fülle von Publikationen und Produktneuheiten in diesem Bereich wider. Der Bekanntheitsgrad von BIM ist jedoch bei den ausführenden Bauunternehmen wesentlich geringer als bei den Bauplanern [17]. Die Mehrheit der Unternehmen erachten BIM als wichtig oder sehr wichtig [70]. Lediglich 23 % setzen diese Technik auch tatsächlich ein, in Österreich sogar nur etwa die Hälfte [70]. BIM liegt die Idee eines ganzheitlichen Modells zugrunde, das mit semantischen Daten angereichert wird und während des gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks allen Beteiligten als gemeinsame Datenbasis dient [71]. Die Daten umfassen u. a. die dreidimensionale Geometrie des Bauwerks, Materialeigenschaften, Sicherheitsmerkmale, Kosten und Zeitpläne [72].

Diese gemeinsame Datenbasis dient als gewerkeübergreifende Projektumgebung, ermöglicht eine bessere Zusammenarbeit, einen effizienteren Datenaustausch und erleichtert die Erkennung und

Beseitigung von Planungsmängeln [9, 70]. Die genannten Eigenschaften ebnen den Weg für eine Parallelisierung von Tätigkeiten während der Planung und Bauausführung [2]. Neben effizienteren Prozessen und der Verbesserung bei der Bauablaufsteuerung wird die aussagekräftige Kostenplanung als weiterer großer Nutzen von BIM genannt. Nicht zuletzt erleichtert ein digitales Modell mit hohem Detailgrad alternative Herstellungsmethoden wie beispielsweise den Einsatz von Fertigteilen und 3D-Druck. Als Hürden sind unzureichende Kenntnisse, die Kosten und die Finanzierung im Voraus, das Fehlen von Standards, rechtliche Aspekte sowie Netzwerkeffekte zu erwähnen [9]. Prinzipiell kann zwischen Planungsmodell (as-planned) und dem Bestandsmodell eines Bauwerks (as-built) unterschieden werden [72]. Ähnlich wie bei PM (Abschnitt 3.1.4) automatisiert Prozessmodelle abgeleitet werden, gibt es Bestrebungen, mithilfe von Sensordaten automatisiert Bestandsmodelle zu erstellen. Ziel ist beispielsweise, diese Modelle während der Bauausführung fortwährend mit Planungsmodellen zu vergleichen, um die Anzahl der Baumängel zu reduzieren [2]. Mithilfe von ereignisorientierter Simulation (engl. Discrete-event Simulation, DES) können Prozessmodelle und statistische Daten einzelner Tätigkeiten während der Planungsphase dazu genutzt werden, alternative Ausführungsszenarien zu finden, womit Produktivitätssteigerungen von 30 % bis 200 % beobachtet wurden [54].

3.4.2 Informationssicherheit

Informationssicherheit ist die Summe aller Maßnahmen, um Informationen oder Informationssysteme vor unerlaubtem Zugriff, Veröffentlichung, Verwendung, Bearbeitung, Störung oder Zerstörung zu bewahren [73]. Die drei Schlüsselkonzepte der IT-Sicherheit, die gemeinsam als CIA bezeichnet werden, sind Vertraulichkeit (engl. confidentiality), Integrität (engl. integrity) und Verfügbarkeit (engl. availability) [65, 74]. Vertraulichkeit bedeutet, eine Offenlegung von Informationen an unautorisierte Parteien zu verhindern, Integrität bezeichnet das Unterbinden von Bearbeitungen durch unautorisierte Parteien, Verfügbarkeit stellt schließlich die jederzeitige Zugänglichkeit der Informationen sicher. Authentizität ist ein weiteres Konzept, das zum Ziel hat, die Echtheit einer Transaktion oder einer Partei sicherzustellen. Mithilfe von Kryptographie können Informationen in eine Form übergeführt werden, in der sie für alle bis auf autorisierte Parteien unverwertbar sind.

Sicherheitsbedenken sind nach Statistik Austria [35] der Hauptgrund, um von der Nutzung von Cloud Services abzusehen. Unternehmen der BW stufen mehrheitlich das Thema IT-Sicherheit als wichtig ein [17] und sehen Datensicherheit als Risiko der Digitalisierung und als Konfliktpunkte bei der Umsetzung von BIM [23, 75]. Umgesetzte Sicherheitsmaßnahmen bestehen überwiegend aus technischen Maßnahmen. Organisatorischen Maßnahmen, wie z. B. Mitarbeiterschulungen, werden derzeit nur geringe Beachtung beigemessen. Nur ein Viertel der Unternehmen plant in nächster Zeit in IT-Sicherheit zu investieren. Trotz der enormen Popularität von BIM, gibt es erstaunlich wenige Veröffentlichungen, die sich mit den damit verbundenen Sicherheitsaspekten befassen. Boyes [65] schlägt einen aus Regeln, Schulungsmaßnahmen und technischen Vorkehrungen bestehenden Ansatz zur Informationssicherheit von BIM-Projekten vor.

4 DIGITALE SYSTEME

Wir wollen nun die vorgestellten Forschungsthemen weiter strukturieren, indem wir zuerst zwei grundlegende Dimensionen einführen, in denen sich digitale Systeme betrachten lassen, und anschließend auf diese Dimensionen zurückgreifen, um die Forschungsthemen einzuordnen. Das Ergebnis dieser Einordnung bezeichnen wir als interdisziplinäre Forschungsmatrix. Gemäß der von uns gewählten informatischen Sichtweise lassen sich digitale Systeme in den in Tab. 1 beschriebenen Dimensionen „Datenfluss“ und „Abstraktion“ betrachten.

Dimension	Werte
Datenfluss	Eingabe, Kommunikation, Verarbeitung, Ausgabe
Abstraktion	Interface, Software, Integration, Gerät, Physik

Tab. 1. Die zwei Dimensionen „Datenfluss“ und „Abstraktion“ mit entsprechenden Werten

Tab.1. The two dimensions „data flow “ and „abstraction“ with corresponding values

4.1 DATENFLUSS

Verallgemeinert gestaltet sich der Datenfluss digitaler Systeme wie in Abb. 6 dargestellt. Die Umwelt stellt die Gesamtheit aller Akteure dar, die in Interaktion mit dem System treten. Konkret sind es physikalische Größen (z. B. Temperatur, elektromagnetische Größen, Kraft etc.), auf höherer Abstraktionsebene sind dies Menschen, Maschinen, chemische Substanzen oder Daten, die auf das System einwirken. Die Eingabe erfolgt, indem diese Größe über einen Sensor, eine Netzwerkschnittstelle oder ein für die menschliche Bedienung ausgelegtes Eingabegerät (z. B. Tastatur) erfasst wird. Über eine für die Kommunikation zuständige Komponente werden die Daten schließlich einer Verarbeitung zugeführt, die aus einer Speicherung, numerischen Manipulation, Filterung, Aggregation etc. bestehen kann. Die Ausgabe erfolgt mittels eines Aktors, der die Daten wieder in eine physikalische Größe wandelt. Das kann beispielsweise ein Gerät sein, das ein elektrisches Signal in eine mechanische Bewegung umsetzt, oder ein Monitor, der ein digitales Signal in ein komplexes Bild umwandelt. Für real existierende Systeme gilt auf physikalischer Ebene das Prinzip der Kausalität, demgemäß es keine Ausgaben vor einer Eingabe geben kann. Im dargelegten Schema ist der Datenfluss aus logischer Sicht zu betrachten und unabhängig davon, ob ein uni- oder bidirektionales Übertragungsverfahren oder eine Polling- oder Pushing-Technik zur Anwendung kommt. Beim Polling handelt es sich um eine Technik, bei der der Empfänger den Sender periodisch auf das Vorhandensein neuer Informationen abfragt, während beim Pushing der Sender selbstständig den Informationsaustausch anstößt.

Als hardwarenahes Beispiel für ein solches, digitales System sei das elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) eines modernen Kraftfahrzeugs genannt, bei dem die Sensoren (Eingabe) Lenkschlag, Drehraten der Räder und Drehraten des Fahrzeuges messen und diese Daten über ein Bus-system (Kommunikation) einem Regelalgorithmus in einem Steuergerät (Verarbeitung) zuführen. Über ein Übertragungssystem (Kommunikation) werden dessen Stellgrößen schließlich an die Aktoren (Ausgabe) weitergeleitet, die in das Bremsverhalten eingreifen. Ein ERP-System (Enterprise Resource Planning) wäre ein Beispiel eines digitalen Systems auf höherer Abstraktionsebene. Die Daten aus der Produktion (Eingabe) werden von einem Manufacturing Execution System (MES) über einen Enterprise Service Bus (ESB, Kommunikation) einem ERP-System zugeführt (Verarbeitung). Gemäß der Produktionsplanung kann dieses System z. B. über EDI (Electronic Data Interchange, Kommunikation) eine automatische Bestellung von Produktionsfaktoren bei den Lieferanten (Ausgabe) absetzen.

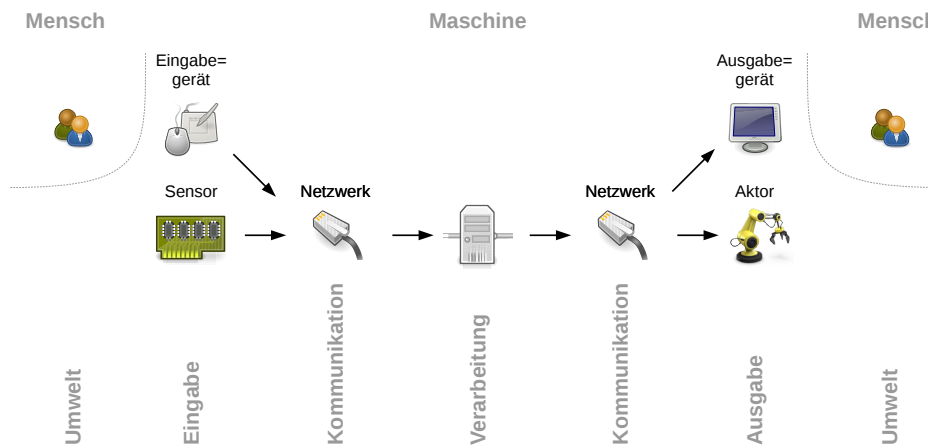


Abb. 6. Schema des Datenflusses in digitalen Systemen

Fig. 6. Model of the data flow within digital systems

4.2 ABSTRAKTION

Abstraktion bedeutet, die Sicht auf ein System von unwesentlichen Details zu befreien. Welche Details als unwesentlich erachtet werden, ist von der jeweiligen Perspektive auf ein System abhängig. Abstraktionsfähigkeit ist eine der höchsten kognitiven menschlichen Fähigkeiten, beispielsweise die Deutung von Strichen als Buchstaben, das Gruppieren von Buchstaben zu einem Wort und schließlich die Zuordnung einer Bedeutung. Abhängig von der Perspektive kann es dabei unwesentlich sein, ob das Wort gelesen oder gehört wird, oder ob das Wort in englischer oder deutscher Sprache formuliert ist, was in beiden Fällen eine Form von Abstraktion darstellt. Als weiteres Bei-

spiel sei eine digitale Schaltung genannt, bei der auf einer logischen Abstraktionsebene zwischen den beiden Zuständen „Null“ und „Eins“ unterschieden, es aber als unwesentlich erachtet wird, wie sich die Ladungsträger in einem einzelnen Transistor verhalten. Umgekehrt ist es aus physikalischer Sicht unwesentlich, welcher Algorithmus mit einer digitalen Schaltung bearbeitet wird.

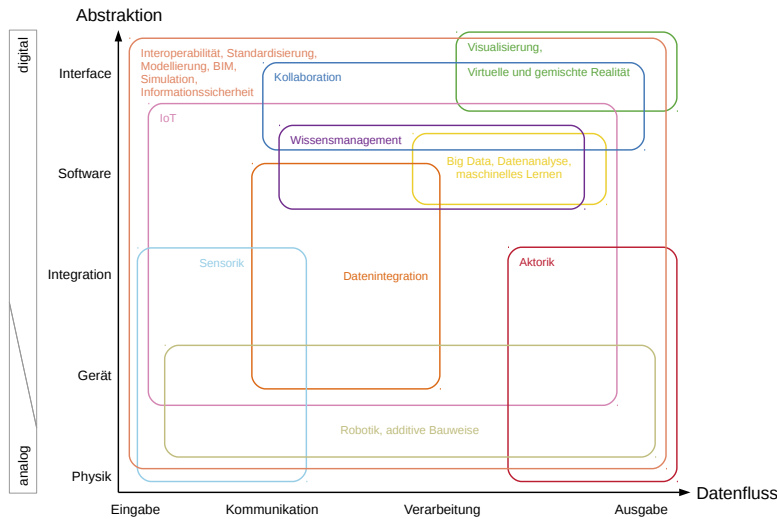


Abb. 7. Die Forschungsmatrix in graphischer Form als Ergebnis der Einordnung der Forschungsthemen in die Dimensionen „Abstraktion“ und „Datenfluss“

Fig. 7. A visual representation of the research matrix as the result of the placement of the research topics in the dimensions „abstraction“ and „data flow“

Die in Tabelle 1 gegebene fünfteilige, an [2] angelehnte Gliederung lässt sich weiter verfeinern. Beispielsweise können auf physikalischer Ebene Kontinuumsmodelle als Abstraktion quantenmechanischer Modelle aufgefasst werden, Geräte als Systeme, die sich aus Baugruppen und Bauelementen zusammensetzen oder komplexe Softwaresysteme als solche, die aus einer Schicht von Kernservices und einer Anwendungslogik bestehen.

4.3 INTERDISZIPLINÄRE FORSCHUNGSMATRIX

Wir wollen nun die eingeführten Dimensionen dazu nutzen, die in Abschnitt 3 vorgestellten Forschungsthemen einzuordnen. Das Ergebnis ist eine interdisziplinäre Forschungsmatrix in graphischer Form, wie in Abb. 7 dargestellt. Wie sich der Abbildung entnehmen lässt, verstehen sich einige der Themen nicht als klar voneinander isolierbare Einheiten, sondern stehen in enger Bezie-

hung zu einander oder bilden zusammen ein größeres Ganzes, das den interdisziplinären Charakter dieser Matrix widerspiegelt. Zum Beispiel liefern die Themenbereiche Sensorik, Aktorik, IoT und Data Mining, Wissensrepräsentation und Visualisierung die Grundlage für komplexe Sensor-Aktuator-Internet-Systeme [58], die in zukünftigen Planungs- und Bauprozessen eine entscheidende Rolle spielen könnten. Die Abbildung verdeutlicht überdies, dass zur Bearbeitung der Forschungsthemen eine enge Vernetzung über die Forschungsbereiche BW und Informatik hinaus notwendig ist.

5. RESÜMEE

Der vorliegende Artikel präsentiert eine Auswahl der in der Literatur behandelten Forschungsthemen der Digitalisierung mit Relevanz auf die BW. Die Forschungsthemen wurden gemäß übergeordneter Forschungsfelder klassifiziert und schließlich in eine zweidimensionale interdisziplinäre Forschungsmatrix eingeordnet. Der Artikel bringt zum Ausdruck, dass BIM nicht als Synonym zu Digitalisierung der BW zu sehen ist, sondern unumstritten als wesentlicher Teilaspekt. Nicht zuletzt wird deutlich, dass es zur Stärkung der Digitalisierung in der BW einer interdisziplinären Zusammenarbeit bedarf.

Die interdisziplinäre Forschungsmatrix lässt sich um zusätzliche Dimensionen erweitern, wie beispielsweise bauwirtschaftliche Sparten (Hochbau, Tiefbau etc.), organisatorische Einheiten (Beschaffung, Vertrieb etc.) und operative Phasen (Planen, Bauen, Betreiben). Diese Forschungsmatrix soll zukünftig als Grundlage für Diskussionen mit Industriepartnern dienen, um daraus konkrete Forschungsfragen abzuleiten, die schließlich im Rahmen einschlägiger Forschungsprojekte bearbeitet werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Hofstadler, Christian (2014): „Produktivität im Baubetrieb, Bauablaufstörungen und Produktivitätsverluste“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN: 3642416322, DOI: 10.1007/978-3-642-41633-0.
- [2] Gerbert, Philipp/ Castagnino, Santiago/ Rothballer, Christoph et al. (2016): „Digital in Engineering and Construction, The Transformative Power of Building Information Modeling“, Forschungsber., Boston Consulting Group, URL: <https://www.bcg.com/publications/2016/engineered-products-infrastructuredigital-transformative-power-building-information-modeling.aspx> (besucht am 29.12.2017).
- [3] McKinsey & Company (2016): „Imagining construction’s digital future“, URL: <http://www.mckinsey.com/industries/capital-projects-and-infrastructure/our-insights/imagining-constructions-digital-future>. (besucht am 01.08.2017)
- [4] U.S. Bureau of Labor Statistics, Office of Productivity and Technology (2017): „1987–2015 Nonmanufacturing Multifactor Productivity, Nonmanufacturing Sectors and NIPA-level Nonmanufacturing Industries KLEMS Multifactor Productivity Tables by Industry“, URL: <https://www.bls.gov/mfp/mprload.htm> (besucht am 03.10.2017).
- [5] European Commission (2016a): „European Construction Sector Observatory, Country profile Austria“, URL: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/23527/attachments/1/translations/> (besucht am 19.10.2017).
- [6] Arnaud, Benoit/ Dupont, Julien/ Koh, Seung-Hee et al. (2011): „Measuring MultiFactor Productivity by Industry: Methodology and First Results from the OECD Productivity Database“, in: The Statistics Newsletter for the extended OECD statistical network (54), URL: <https://www.oecd.org/std/49230023.pdf> (besucht am 03.10.2017).
- [7] Schober, Kai-Stefan/ Hoff, Philipp (2016): „Digitalisierung der Bauwirtschaft, Der europäische Weg zu, ‘Construction 4.0’“, Roland Berger GmbH.
- [8] Vereen, Stephanie C./ Rasdorf, William/ Hummer, Joseph E. (2016): „Development and Comparative Analysis of Construction Industry Labor Productivity Metrics“, in: Journal of Construction Engineering and Management, Band 142 – Heft 7, S. 04016020, DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001112.
- [9] World Economic Forum (2016): „Shaping the Future of Construction, A Breakthrough in Mindset and Technology“, Forschungsber.
- [10] McKinsey & Company (2017): „Reinventing Construction: A Route to Higher Productivity“, „Executive Summary“.
- [11] European Commission (2016b): „The European construction sector, A global partner“, URL: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/15866/attachments/1/translations/en/renditions/native> (besucht am 17.10.2017).
- [12] KMU Forschung Austria (2016): „Bauforschung 2020, Potenzialanalyse Bauwirtschaft“, „Studie zum branchenspezifischen Forschungsbedarf“, Forschungsber., URL: http://www.kmuforschung.ac.at/images/stories/Forschungsberichte/2016/Bauforschung_2020.pdf (besucht am 20.10.2017).
- [13] Wirtschaftskammer Österreich, Stabsabteilung Statistik (2017): „Statistisches Jahrbuch“.
- [14] European Construction Industry Federation (FIEC) (2016): „Annual Report 2016“, URL: <http://www.fiec.eu/en/cust/documentrequest.aspx?DocID=46093>. (besucht am 15.08.2017)

- [15] Bossink, B. A. G./ Brouwers, H. J. H. (1996): „Construction Waste: Quantification and Source Evaluation“, in: Journal of construction engineering and management, Band 122 – Heft 1, S. 55–60.
- [16] European Commission (2011): „Roadmap to a Resource Efficient Europe“, 571, URL: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0571&from=EN> (besucht am 04.10.2017).
- [17] BRZ Deutschland GmbH (2016): „IT-Trends in der Baubranche 2016“.
- [18] Chou, Yen-Chun/ Chuang, Howard Hao-Chun/ Shao, Benjamin B.M. (2014): „The impacts of information technology on total factor productivity: A look at externalities and innovations“, in: International Journal of Production Economics, Band 158 – Heft Supplement C, S. 290–299, ISSN: 0925-5273, DOI: 10.1016/j.ijpe.2014.08.003.
- [19] Fitzgerald, Michael/ Kruschwitz, Nina/ Bonnet, Didier et al. (2014): „Embracing Digital Technology, A New Strategic Imperative“, English, in: MIT Sloan Management Review, Band 55 – Heft 2.
- [20] Fulford, Richard/ Standing, Craig (2014): „Construction industry productivity and the potential for collaborative practice“, in: International Journal of Project Management, Band 32 – Heft 2, S. 315–326, ISSN: 0263-7863, DOI: 10.1016/j.ijproman.2013.05.007.
- [21] Kivrak, Serkan/ Arslan, Gokhan/ Cagatay, Oytun (2010): „Information Technology Usage Impacts on Construction Projects' Success“, in: Proceedings of 10th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, Vilnius: Vilnius Gediminas Techn. Univ., S. 431–435.
- [22] Molnar, Miklos/ Andersson, Ronny/ Ekholm, Anders (2007): „Benefits of ICT in the Construction Industry, Characterization of the Present Situation in Housebuilding Processes“, eng, in: Proceedings of the W78 Conference, Maribor 2007, S. 423–428, URL: <http://lup.lub.lu.se/record/935306> (besucht am 02.01.2018).
- [23] Goger, Gerald/ Piskernik, Melanie/ Urban, Harald (2017): „Potenziale der Digitalisierung im Bauwesen, Empfehlungen für zukünftige Forschung und Innovationen“, Forschungsber.
- [24] Tocci, Ronald J./ Widmer, Neal S. (2001): „Digital Systems, Principles and Applications“, 8. Aufl., Prentice Hall, ISBN: 0-13-085634-7.
- [25] Stolterman, Erik/ Fors, Anna Croon (2004): „Information Technology and the Good Life“, in: Information Systems Research, Relevant Theory and Informed Practice, edited proceedings of the WG8.2 conference, Relevant Theory and Informed Practice: Looking Forward from a 20-Year Perspective on IS Research, Manchester, UK, July 2004, hrsg. von Bonnie Kaplan/ Duane P. Truex/ David Wastell et al., Bd. 143, IFIP, Springer, Kap. 45, ISBN: 978-1-4020-8094-4, DOI: 10.1007/b115738.
- [26] Statistik Austria (2017): „ÖNACE 2008, Grundstruktur & Erläuterungen“, „Ö-Version der NACE Rev. 2“, URL: http://www.statistik.at/kdb/downloads/pdf/OENACE2008_DE_CTE_20170727_030435.pdf (besucht am 24.10.2017).
- [27] Oberndorfer, Wolfgang/ Jodl, Hans Georg, Hrsg. (2010): „Handwörterbuch der Bauwirtschaft“, 3. Aufl., Wien: Austrian Standards plus Publishing, ISBN: 9783854022190.
- [28] Chen, Min/ Mao, Shiwen/ Liu, Yunhao (2014): „Big Data: A Survey“, in: Mobile Networks and Applications, Band 19 – Heft 2, S. 171–209, ISSN: 1572-8153, DOI: 10.1007/s11036-013-0489-0.
- [29] Bilal, Muhammad/ Oyedele, Lukumon O./ Qadir, Junaid et al. (2016): „Big Data in the construction industry: A review of present status, opportunities, and future trends“, in: Advanced Engineering Informatics, Band 30 – Heft 3, S. 500–521, ISSN: 1474-0346, DOI: 10.1016/j.aei.2016.07.001.

- [30] Wikipedia (o.D.), [https://\[en|de\].wikipedia.org/](https://[en|de].wikipedia.org/).
- [31] Cooper, Paul (2017): „Data, information, knowledge and wisdom“, in: Anaesthesia & Intensive Care Medicine, Band 18 – Heft 1, S. 55-56, ISSN: 1472-0299, DOI: 10.1016/j.mpaic.2016.10.006.
- [32] Gašević, Dragan/ Djurić, Dragan/ Devedžić, Vladan (2009): „Model Driven Engineering and Ontology Development“, 2. Aufl., Springer, ISBN: 978-3-642-00281-6, DOI: 10.1007/978-3-642-00282-3.
- [33] Rezgui, Yacine/ Zarli, Alain (2006): „Paving the Way to the Vision of Digital Construction: A Strategic Roadmap“, in: Journal of Construction Engineering and Management, Band 132 – Heft 7, S. 767-776, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2006)132:7(767).
- [34] Kvasina, Gabrijela (2018): „Dokumentation bei zyklischem Tunnelvortrieb, Erhebung von wesentlichen Parametern von Bauzeit und Kosten als Grundlage für ein digitales Modell“, Diplomarbeit, TU Wien.
- [35] Statistik Austria (2016): „IKT-Einsatz in Unternehmen, Einsatz von Informations und Kommunikationstechnologien in Unternehmen 2014“, Forschungsber., URL: http://www.statistik.at/wcm/idc/idcplg?Idc-Service=GET_NATIVE_FILE&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&dDocName=110838 (besucht am 24.10.2017).
- [36] Armstrong, Geno/ Gilge, Clay (2016): „Building a technology advantage, Harnessing the potential of technology to improve the performance of major projects“, „Global Construction Survey 2016“, Forschungsber., KPMG, URL: <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/xx/pdf/2016/09/global-construction-survey-2016.pdf> (besucht am 17.10.2017).
- [37] Weidner, Jörg/ Hasenclever, Tobias (2011): „Last-Meter-Baulegistik – Intelligente Anlieferkonzepte für das komplexe Baustellenumfeld“, in: Digitale Baustelle – innovativer Planen, effizienter Ausführen, Werkzeuge und Methoden für das Bauen im 21. Jahrhundert, hrsg. von Willibald Günthner/ André Borrmann, VDI-Buch, Berlin, Heidelberg: Springer, Kap. 5.3.6, ISBN: 9783642164866, DOI: 10.1007/9783-642-16486-6.
- [38] Adriaanse, Arjen/ Voordijk, Hans/ Dewulf, Geert (2010): „The use of interorganisational ICT in United States construction projects“, in: Automation in Construction, Band 19 – Heft 1, S. 73-83, ISSN: 0926-5805, DOI: 10.1016/j.autcon.2009.09.004.
- [39] Gartner (2017): „Top Trends in the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2017“, hrsg. von Kasey Panetta, URL: <http://www.gartner.com/smarterwithgartner/top-trends-in-the-gartner-hype-cycle-for-emergingtechnologies-2017/> (besucht am 12.10.2017).
- [40] Goodfellow, Ian/ Bengio, Yoshua/ Courville, Aaron (2016): „Deep Learning“, Adaptive computation and machine learning, ISBN: 978-0-262-03561-3.
- [41] Bishop, Christopher M. (2006): „Pattern recognition and machine learning“, corr. print., Information science and statistics, New York, NY: Springer, ISBN: 9780387310732; 0387310738.
- [42] James, Gareth/ Witten, Daniela/ Hastie, Trevor et al. (2013): „An Introduction to Statistical Learning, with Applications in R“, Springer Texts in Statistics, New York: Springer, ISBN: 978-1-4614-7137-0, DOI: 10.1007/978-1-4614-7138-7.
- [43] Müller, Andreas C./ Guido, Sarah (2016): „Introduction to Machine Learning with Python, A Guide for Data Scientists“, O’Reilly Media.
- [44] van der Aalst, Wil M. P. (2011): „Process Mining, Discovery, Conformance and Enhancement of Business Processes“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN: 9783-642-19344-6; 978-3-642-19345-3, DOI: 10.1007/978-3-642-19345-3.
- [45] van Schaijk, S./ Berlo, L.A.H.M. van (2016): „Introducing process mining for AECFM: Three experimental

case studies“, in: eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction, 11th European Conference on Product and Process Modelling (ECPM2016), (10. Okt. 2017), hrsg. von Symeon E. Christodoulou/ Raimar Scherer, CRC Press/Balkema, S. 481–486, ISBN: 978-1-138-032804; 978-1-315-38689-8.

[46] Li, Heng/ Chan, Greg/ Wong, Johnny Kwok Wai et al. (2016): „Real-time locating systems applications in construction“, in: Automation in Construction, Band 63 – Heft Supplement C, S. 37–47, ISSN: 0926-5805, DOI: 10.1016/j.autcon.2015.12.001.

[47] World Economic Forum (2015): „Deep Shift, Technology Tipping Points and Societal Impact“, Forschungsber.

[48] Ida, Nathan (2014): „Sensors, Actuators, and their Interfaces“, hrsg. von Dudley R. Kay, Edison: SciTech Publishing, ISBN: 978-1-61353-006-1.

[49] Winfield, Alan F. T. (2012): „Robotics – A Very Short Introduction“, Oxford: Oxford Univ. Press, ISBN: 978-0-19-969598-0; 0-19-969598-9.

[50] Siegert, Hans-Jürgen/ Bocionek, Siegfried (1996): „Robotik: Programmierung intelligenter Roboter“, Berlin, Heidelberg: Springer, ISBN: 978-3-540-60665-9.

[51] Bock, T./ Linner, T./ Ikeda, W. (2012): „Exoskeleton and Humanoid Robotic Technology in Construction and Built Environment“, in: The Future of Humanoid Robots, Research and Applications, hrsg. von Riadh Zaier, InTech, ISBN: 978-953307-951-6, DOI: 10.5772/1407.

[52] Works, Richard (2017): „The impact of technology on labor markets“, in: Monthly Labor Review.

[53] Acemoglu, Daron/ Restrepo, Pascual (2017): „Robots and Jobs: Evidence from US Labor Markets“, Working Paper 23285, National Bureau of Economic Research, DOI: 10.3386/w23285, URL: <http://www.nber.org/papers/w23285>.

[54] Hammad, Amin/ Vahdatikhaki, Faridaddin/ Zhang, Cheng et al. (2012): „Towards the Smart Construction Site: Improving Productivity and Safety of Construction Projects Using Multi-agent Systems, Real-time Simulation and Automated Machine Control“, in: Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference, IEEE, ISBN: 978-1-4673-4781-5, DOI: 10.1109/WSC.2012.6465160.

[55] Labonnote, Nathalie/ Rønquist, Anders/ Manum, Bendik et al. (2016): „Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities“, in: Automation in Construction, Band 72 – Heft 3, S. 347–366, ISSN: 0926-5805, DOI: 10.1016/j.autcon.2016.08.026.

[56] Ware, Colin (2004): „Information Visualization – Perception for Design“, 2. Aufl., Interactive Technologies, Elsevier Science, ISBN: 1-55860-819-2.

[57] Azuma, R./ Baillot, Y./ Behringer, R. et al. (2001): „Recent advances in augmented reality“, in: IEEE Computer Graphics and Applications, Band 21 – Heft 6, S. 34–47, ISSN: 0272-1716, DOI: 10.1109/38.963459.

[58] Gubbi, Jayavardhana/ Buyya, Rajkumar/ Marusic, Slaven et al. (2013): „Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions“, in: Future Generation Computer Systems, Band 29 – Heft 7, S. 1645–1660, ISSN: 0167-739X, DOI: 10.1016/j.future.2013.01.010.

[59] Georgakopoulos, Dimitrios/ Jayaraman, Prem Prakash (2016): „Internet of things: from internet scale sensing to smart services“, in: Computing, Band 98 – Heft 10, S. 1041–1058, ISSN: 1436-5057, DOI: 10.1007/s00607-016-0510-0.

[60] Shah, Chirag (2015): „Collaborative Information Seeking: From ‘What?’ and ‘Why?’ to ‘How?’ and ‘So What?’“, in: Collaborative Information Seeking, hrsg. von Preben Hansen/ Chirag Shah/ Claus-Peter Klas, Springer International Publishing, Kap. 1, DOI: 10.1007/978-3-319-18988-8.

- [61] Richter-von Hagen, Cornelia/ Stucky, Wolffried (2004): „Business-Process- und Workflow-Management: Prozessverbesserung durch Prozess-Management“, TeubnerReihe Wirtschaftsinformatik, ISBN: 3519004917.
- [62] Munkvold, Bjørn Erik (2003): „Implementing Collaboration Technologies in Industry - Case Examples and Lessons Learned“, Computer Supported Cooperative Work, Springer, ISBN: 9781852334185; 1852334185, DOI: 10.1007/978-1-4471-0073-7.
- [63] Motahari-Nezhad, Hamid R./ Swenson, Keith D. (2013): „Adaptive Case Management: Overview and Research Challenges“, in: IEEE 15th Conference on Business Informatics, CBI 2013, Vienna, Austria, July 15-18, 2013, S. 264-269, DOI: 10.1109/CBI.2013.44.
- [64] Aalst, W.M.P. van der/ Stoffele, M./ Wamelink, J.W.F. (2003): „Case handling in construction“, in: Automation in Construction, Band 12 – Heft 3, S. 303-320, ISSN: 0926-5805, DOI: 10.1016/S0926-5805(02)00106-1.
- [65] Boyes, Hugh (2014): „Building Information Modelling (BIM): Addressing the Cyber Security Issues“, Institution of Engineering und Technology.
- [66] European Communities (2004): „European Interoperability Framework for PanEuropean Egovernment Services“, Luxembourg, URL: <http://ec.europa.eu/idabc/servlets/Doca2cd.pdf>. (besucht am 11.11.2017)
- [67] Brambilla, Marco/ Cabot, Jordi/ Wimmer, Manuel (2012): „Model-Driven Software Engineering in Practice“, 2. Aufl., Synthesis lectures on software engineering, San Rafael: Morgan & Claypool Publishers, ISBN: 9781627057080; 9781627059886; 9781627056953, DOI: 10.2200/S00441ED1V01Y201208SWE001.
- [68] List, Beate/ Korherr, Birgit (2006): „An Evaluation of Conceptual Business Process Modelling Languages“, in: Proceedings of the 2006 ACM Symposium on Applied Computing, SAC '06, Dijon, France: ACM, S. 1532-1539, ISBN: 1-59593-108-2, DOI: 10.1145/1141277.1141633.
- [69] Simsion, Graeme C./ Witt, Graham C. (2005): „Data modeling essentials“, 3. Aufl., The Morgan Kaufmann Series in Data Management Systems, Morgan Kaufmann, ISBN: 1-281-02005-2; 9786611020057; 0-08-048867-6.
- [70] Conject (2015): „BIM-Umfrage 2015, Auswertung“, Forschungsber., URL: <https://www.conject.com/de/de/whitepaper-ergebnisse-der-conject-bimumfrage>. (besucht am 05.09.2017)
- [71] Borrmann, André, Hrsg. (2015): „Building information modeling; technologische Grundlagen und industrielle Praxis“, VDI-Buch, Wiesbaden: Springer Vieweg, ISBN: 978-3-658-05605-6, DOI: 10.1007/978-3-658-05606-3.
- [72] Pătrăucean, Viorica/ Armeni, Iro/ Nahangi, Mohammad et al. (2015): „State of research in automatic as-built modelling“, in: Advanced Engineering Informatics, Band 29 – Heft 2, Infrastructure Computer Vision, S. 162-171, ISSN: 1474-0346, DOI: 10.1016/j.aei.2015.01.001.
- [73] Sattarova Feruza, Y/ Kim, Tao-hoon (2007): „IT security review: Privacy, protection, access control, assurance and system security“, in: International journal of multimedia and ubiquitous engineering, Band 2 – Heft 2, S. 17-31.
- [74] Stamp, Mark (2006): „Information Security, Principles and Practice“, John Wiley & Sons, ISBN: 978-0-471-73848-0.
- [75] Peansupap, Vachara/ Walker, Derek H.T. (2006): „Information communication technology (ICT) implementation constraints – A construction industry perspective“, in: Engineering, Construction and Architectural Management, Band 13 – Heft 4, S. 364-379, ISSN: 0969-9988, DOI: 10.1108/09699980610680171.