



IoC – Internet of Construction

Sigrid Brell-Cokcan · Robert H. Schmitt
(Hrsg.)

IoC – Internet of Construction

Informationsnetzwerke zur
unternehmensübergreifenden
Kollaboration in den Fertigungsketten
des Bauwesens

Hrsg.

Sigrid Brell-Cokcan 
Individualisierte Bauproduktion, RWTH
Aachen University
Aachen, Nordrhein-Westfalen, Deutschland

Robert H. Schmitt 
Werkzeugmaschinenlabor WZL
RWTH Aachen University
Aachen, Deutschland

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Programm „Zukunft der Wertschöpfung – Forschung zu Produktion, Dienstleistung und Arbeit“ gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.

GEFÖRDERT VOM

BETREUT VOM



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

ISBN 978-3-658-42543-2

ISBN 978-3-658-42544-9 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-42544-9>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2024

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Karina Danulat

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Das Papier dieses Produkts ist recyclebar.

Vorwort (Internet of Construction)

Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Buches steht die Bauwirtschaft in Europa aktuell unter enormem Druck durch Klimawandel, Krieg, Pandemie und hohe Inflation. Damit verbunden sind unkalkulierbare Risiken für Bauprojekte und eine Baukostenexplosion, wie sie die Bauwirtschaft zuletzt 1970 in der (alten) Bundesrepublik erlebt hat. Die aktuelle Baupreissteigerung (2. Quartal 2021–2. Quartal 2022) beträgt im Wohnungsbau laut Statistischem Bundesamt derzeit 17,6 % und liegt damit deutlich über der aktuellen Inflationsrate von 10 %. Der Wohnungsbau wird damit für Privatpersonen und die öffentliche Hand immer unbezahlbarer. Im Jahr 1970 gab es eine ähnlich dynamische Preisentwicklung mit einem Anstieg der Baupreise um 15 % innerhalb eines Jahres. Damals war zu beobachten, dass die Bautätigkeit für einige Jahre stark zurückging und der Wohnungsbau, insbesondere der private Bau von Ein- und Zweifamilienhäusern, mehr oder weniger zum Stillstand kam.

Darüber hinaus sind derzeit weltweit Preissteigerungen aufgrund von Lieferengpässen, begrenzten Ressourcen und eingeschränkten Abbaurechten zu beobachten. Besonders betroffen sind die LB 012/LB 013 Mauerarbeiten/Betonarbeiten, LB 016 Zimmer- und Holzbauarbeiten, LB 017 Stahlbauarbeiten, die auch im Fokus dieses Forschungsberichtes stehen.

Im Gegensatz zur industriellen Produktion gehört die Baubranche zu den am wenigsten digitalisierten Arbeitsbereichen und kämpft über die aktuelle Weltwirtschaftskrise hinaus mit mittlerweile dauerhaften Imageproblemen wie hohen Preis- und Kostenexplosionen, eklatantem Fachkräftemangel und Materialknappheit, Unattraktivität des Arbeitsplatzes verbunden mit hohem Unfallrisiko sowie zunehmenden Baumängeln und Terminverzögerungen.

Die in diesem Buch veröffentlichte Forschung zum Internet of Construction verfolgt das Ziel, die physische Realisierung eines Bauwerks auf der Baustelle und in der Vorfertigung empirisch zu untersuchen und das damit verbundene Informationsnetzwerk in der unternehmensübergreifenden Kollaboration disruptiv auf mögliche Ansätze der Produktionstechnik, u. a. Industrie 4.0, anzupassen und zu validieren. Eine derart breit angelegte Transformationsforschung ist nur in Zusammenarbeit mit einem tragfähigen interdisziplinären Team aus Forschern des Maschinenbaus, der Bauproduktion, der

Wirtschaftlichkeitsanalyse, innovativen Praxispartnern und Technologiepartnern möglich. Als Ergebnis der letzten drei Forschungsjahre wurde aus bestehenden KI-basierten Methoden eine neue Basis für ein zukünftiges Wissensmodell, die IoC Bauontologie, als Erweiterung der Bauinformationsmodelle (BIM) für die mögliche Orchestrierung von Mensch und Maschine in dynamischen Bauprozessen auf Baustellen und in der Vorfertigung entwickelt.

Dieses Buch dokumentiert eine hervorragende dreijährige Zusammenarbeit mit zum Teil sehr überraschenden Ergebnissen, die in digitalen und realen Demonstratoren in den Laboren, Werkshallen und auf der Referenzbaustelle der RWTH Aachen umgesetzt, getestet und validiert wurden. Einzelne Demonstratoren wurden am Ende des Projektes in den Werkshallen und auf realen Baustellen der Praxispartner auf ihre Anwendbarkeit getestet und haben zu zahlreichen Folgeprojekten an der RWTH Aachen geführt, u. a. 5G Namico gefördert vom Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, TargetX gefördert im EU-Rahmenprogramm Horizon 2020, ECONOM (Entwicklung und Anwendung von Edge-Computing in realer Baustellenumgebung anhand von Prozessdemonstratoren) gefördert vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) und Cloud 56 ebenso gefördert vom BMDV. Weitere Veröffentlichungen zu den Projektergebnissen werden nach Erscheinen dieses Buches in einem VDI-Expertenpapier (VDI EE 2558) und in einem vom Ministerium für Heimat, Kommunales, Bau und Digitalisierung des Landes Nordrhein-Westfalen (MHKBD) geförderten Baupraxisleitfaden für Informationsnetze fortgesetzt. Gemeinsam mit dem deutschen Stahlbauverband (DSTV) sind Arbeitshilfen zur Robotik im Stahlbau entstanden.

Im Namen des gesamten Teams bedanken wir uns bei allen Projektpartnern für die hervorragende Zusammenarbeit, das persönliche Engagement, die Offenheit und den Ideenreichtum bei der Lösung unvorhergesehener Herausforderungen, insbesondere bei den durchgeführten Referenzprozessen der Bauausführung und Vorfertigung. Alle Beiträge, die mit Autoren sowohl aus der Wissenschaft als auch aus der Industrie, den Technologiepartnern und der Baupraxis verfasst wurden, sind mehrfach begutachtet worden und zeigen die erfolgreiche Zusammenarbeit, den Innovationswillen und die entstandene Dynamik aller Forschungspartner. Zusätzlich motiviert wurde das Projekt sicherlich auch durch die geopolitische Situation, die die Bauwirtschaft zunehmend unter Druck setzt, und den wachsenden Innovationsgeist, Antworten auf zunächst drängende und unlösbare Fragen zu finden. Die erzielten Ergebnisse gehen daher weit über den ursprünglich vereinbarten Forschungsrahmenplan aus dem Jahr 2016 hinaus, der sich ebenso dynamisch entwickelt hat wie die aktuellen Herausforderungen im Bauwesen.

Nach diesen wertvollen Erfahrungen in der Anpassungsfähigkeit des Forschungskonsortiums einer repräsentativen Wertschöpfungskette des Bauwesens und nach Abschluss dieser Forschungsarbeit blicken wir daher zuversichtlich in die Zukunft und sind überzeugt, dass die deutsche Bauwirtschaft bereit ist für den Wandel zu mehr Transparenz

durch Digitalisierung und Automatisierung und hoffen, hierzu einen ersten gemeinschaftlichen Forschungsbeitrag für die Baustelle der Zukunft zu leisten.

Wir danken dem Projektträger Karlsruhe für die Betreuung und dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Förderung im Rahmen des Forschungsprogramms „Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen“. Darüber hinaus danken wir allen Partnern und assoziierten Partnern für die enge Zusammenarbeit und das weit über die Projektinhalte hinausgehende Engagement.

Univ.-Prof. Dr. techn. Sigrid Brell-Cokcan

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Schmitt

Forschungseinrichtungen

Individualisierte Bauproduktion (IP) der RWTH Aachen University

Der Lehrstuhl für Individualisierte Bauproduktion der RWTH Aachen University erforscht und entwickelt digitale und automatisierte Systeme für die Vorfertigung und Bauausführung im Bauwesen. Um eine effiziente, individualisierte Produktion ab Losgröße eins zu ermöglichen, werden neue und anwenderfreundliche Methoden der Mensch-Maschine-Interaktion, der Wissensmodellierung und der KI-basierten Automatisierung von Bau- und Planungsprozessen entwickelt.

Innovative Forschungsergebnisse zur „Haptischen Programmierung“ und „Cloud Remote Control“ wurden als Finalisten des KUKA Innovation Award 2016 und des KUKA Innovation Award on Artificial Intelligence 2021 auf der Hannover Messe der Öffentlichkeit vorgestellt. Im Jahr 2022 wurde das Forschungsprojekt ROBETON zum robotergestützten kontrollierten Rückbau von Betonbauteilen für den BAUMA Innovationspreis 2022 nominiert. Das fakultätsübergreifende Center Construction Robotics (CCR) und die Referenzbaustelle auf dem Campus der RWTH Aachen wurden gegründet, um mit internationalen Branchenführern entlang der Wertschöpfungskette der Bauindustrie Automatisierungspotenziale im Bauwesen zu erforschen. Im Jahr 2020 wurde der neue internationale konsekutive Masterstudiengang „Construction & Robotics“ für die Bachelorstudiengänge Architektur, Informatik, Bauingenieurwesen und Maschinenbau initiiert, um fakultätsübergreifend zukünftige Ingenieurinnen und Ingenieure im digitalen Umfeld für die Digitalisierung und Automatisierung im Bauwesen auszubilden.

Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen University

Das Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen erforscht und entwickelt mit über 1000 Mitarbeiter:innen innovative Produktionstechnik unter anderem in den Feldern Fabrikplanung, Montageplanung und -technik, Fertigungsmesstechnik, Qualitäts- und Produktionsmanagement. Der Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement (geleitet von Prof. Schmitt) erforscht in zahlreichen Projekten Fragestellungen zur Digitalisierung und Modellierung für die industrielle Montage. Der Erfolg des Lehrstuhls lässt sich an der Vielzahl vergangener Forschungsprojekte messen: Zum Beispiel im Bereich Montagesystemplanung (z. B. AIMFREE (BMW) und freeMoVe

(BMBF)), messtechnisch-gestützte Montageprozesse (z. B. Fasim XL (AiF)) und kooperierenden mobilen Robotern (z. B. Exzellenzcluster Internet of Production (DFG)). Im Projekt Internet of Construction (BMBF) wurden nun die vergangenen Erfahrungen aus der Produktionstechnik auf das Bauwesen übertragen. Dabei wurden insbesondere die Abbildung von Montagefähigkeiten erläutert, die sich z. B. auf die digitale Abbildung von Anforderungen aus der Bauplanung in die Vorfertigung von Stahl-/Holzbaufertigteile übertragen lassen. Zudem wurde die automatisierte Stahlbau Vormontage mit mobilen Robotern in einem linienlosen Montagesystem realisiert.

International Performance Research Institute – IPRI gGmbH

Das International Performance Research Institute (IPRI) ist ein gemeinnütziges Forschungsinstitut auf dem Gebiet der Betriebswirtschaftslehre. Das IPRI unterstützt durch die Verbindung von akademischer Forschung und industrieller Praxis mittelständische Unternehmen auf ihrem Weg der digitalen Transformation. Als gemeinnütziges Forschungsinstitut für angewandte betriebswirtschaftliche Forschung auf dem Gebiet des Management Accounting und Controls forscht das IPRI mit Schwerpunkten auf interorganisationale Netzwerke, Nachhaltigkeit, intelligente Systeme und Plattformen und transferiert diese Erkenntnisse anwendungsorientiert in die Unternehmenspraxis.

Industrieunternehmen

Liebherr-Werk Biberach GmbH

Die Liebherr-Werk Biberach GmbH wurde 1954 gegründet und zählt heute international zu den größten Herstellern von Turmdrehkränen. Am Standort Biberach entwickelt und produziert das Unternehmen eines der variabelsten Baukran-Programme der Welt. Die leistungsstarken Systeme und Größenklassen bieten für jede Aufgabe im Hochbau die richtige Hebetchnik.

KUKA Deutschland GmbH

KUKA ist ein international tätiger Automatisierungskonzern mit einem Umsatz von rund 3,3 Mrd. EUR und rund 14.000 Mitarbeitenden. Der Hauptsitz des Unternehmens ist Augsburg. Als einer der weltweit führenden Anbieter von intelligenten Automatisierungslösungen bietet KUKA den Kunden alles aus einer Hand: Vom Roboter über die Zelle bis hin zur vollautomatisierten Anlage und deren Vernetzung in Märkten wie Automotive, Electronics, Metal & Plastic, Consumer Goods, E-Commerce/ Retail und Healthcare.

Robots in Architecture Research UG

RiAR forscht und entwickelt an Lösungen für die Anbindung von parametrischem CAD und BIM an Industrie 4.0-Technologien, wobei der Fokus auf der Entwicklung von benutzerfreundlichen Schnittstellen liegt. Durch die Zusammenarbeit mit der Association for Robots in Architecture hat RiAR bereits Erfahrungen in der Einbindung von Personen ohne technischen Hintergrund in die Entwicklung und Planung von

robotergestützten Fertigungsprozessen gesammelt. RiAR konzentriert sich insbesondere auf die direkte Steuerung von Industrie 4.0 Fertigungssystemen aus der digitalen Planung heraus. Insbesondere werden Lösungen für die Losgröße-1-Fertigung entwickelt, die eine individuelle Fertigung von Bauteilen ermöglichen. So werden Lösungen für eine schnelle und benutzerfreundliche Inbetriebnahme, Datenübergabeschnittstellen und Prozessadaptivität entwickelt. Der Fokus liegt dabei im Bereich des fertigungsgerechten Designs und damit einer direkten Verbindung zwischen Design und Fertigung. Die von RiAR entwickelten Schnittstellen werden bereits in der Industrie im Holzbau (Züblin Timber), im Ziegelbau (Keller AG), im großformatigen 3D-Druck (Branch Technologies) und in Architekturbüros (UAC, Foster & Partners) eingesetzt.

WURST Stahlbau GmbH

Mit über 50 Jahre Erfahrung, rund 15.000 Quadratmeter Produktionsfläche vereint Wurst Stahlbau alle Kompetenzen, die für den Stahlbau wichtig sind. Im Einzelnen sind das Industrie- und Gewerbebaulösungen des Stahlbaus und des Projektbaus mit individueller Entwicklung und bedarfsgerechter Planung, Herstellung und Montage sowie Projektmanagement, dem Schlüsselfertigbau und der Revitalisierung vorhandener Bausubstanz.

Die Stahlbauproduktion der Fa. Wurst Stahlbau fokussiert sich auf die Fertigungsprozesse inklusive umfassender Arbeitsvorbereitung mit zeitnaher Materialbeschaffung. Dabei werden Fertigungskapazitäten und Materialbedarfe miteinander abgestimmt und Maschinenbelegpläne, Maschinenstücklisten und maschinenbezogene NC-Programmierung, bedarfsgerecht geplant. In mehreren Fertigungslinien werden Stahlbauelemente zusammengefügt und verschweißt, wobei Robotertechnik verstärkt zum Einsatz kommt. Diese Bauteile werden durch eigene Montageteams zu anspruchsvollen Stahlkonstruktionen und langlebigen Gebäudestrukturen mit Hüllenkonstruktionen montiert. Fa. Wurst Stahlbau legt besonderen Wert auf Qualität und Nachhaltigkeit.

Annen GmbH & Co. KG

Partnerschaftliche Zusammenarbeit ist die Basis, um den qualitativen Anforderungen hoch komplexer Architektur in der Umsetzung gerecht zu werden. Seit 1956 baut ANNEN auf eine ideale Wechselbeziehung zwischen Architekten, Ingenieuren und Handwerkern. Das Kerngeschäft des Unternehmens beläuft sich auf die Planung, Fertigung und Montage von individuellen Fenstern und Fassadensystemen mit teils außergewöhnlicher Ästhetik und hohen technischen Anforderungen, die weit über die teilweise starren Fassadensysteme des Modulbaus hinausgehen – getreu ihres Mottos: „Unmöglich wird oft genannt, was noch niemand versucht hat.“

Im Laufe der Jahrzehnte konnte sich das Familienunternehmen zu einem heute innovativen Schreinereibetrieb mit internationalen Aufträgen entwickeln. Neben Holz gehören inzwischen auch Metall und Glas zu den zentralen Elementen im Materialspektrum. Der Digitalisierungsfortschritt im Fenster- und Fassadenbau nutzt das Unternehmen, um mithilfe modernster Konstruktionstechniken und dem Einsatz innovativer Maschinen- und Softwarelösungen, die architektonischen Herausforderungen in der Ausführung zu

bewältigen. Im Jahr 2021 beschäftigte ANNEN in Deutschland und in Luxemburg rund 145 Mitarbeiter bei Nettoumsatzerlösen von 23,7 Mio. EUR. Durch Kooperationen mit Forschungsinstituten und Universitäten gewährt ANNEN als Partnerunternehmen aus dem Handwerk Einblicke in die Praxis und profitiert gleichzeitig von den innovativen Zukunftsideen der Ingenieure von Morgen.

LAMPARTER GmbH & Co. KG

Die LAMPARTER GmbH & Co. KG ist Spezialist für Stahl- und Metallbau. Zu den Leistungen des Unternehmens gehören beispielsweise die Planung und der Bau von Verbindungsbrücken, Schallschutzfassaden und Glasdächern. Durch die gelungene Symbiose von Stahl und Glas haben Stahl-Glas-Konstruktionen in den letzten Jahrzehnten eine rasante Entwicklung genommen. Durch die Entwicklung von Spezialgläsern sind den architektonischen Ideen heute kaum noch Grenzen gesetzt: So entstehen Bauwerke, die auch höchsten ästhetischen Ansprüchen mühelos gerecht werden. Die heutigen High-tech-Werkstoffe weisen zudem sehr gute energetische Eigenschaften auf und sind umweltfreundlich, da die Rohstoffe für ihre Herstellung nahezu unbegrenzt zur Verfügung stehen. Damit wird eine Stahl-Glas-Konstruktion auch ökologischen Ansprüchen gerecht und entspricht unserem Bedürfnis nach nachhaltigem Bauen. In zahlreichen Bauprojekten konnte die Firma LAMPARTER ihre Qualifikation im Bereich Stahl-Glas-Fassadenbau bereits eindrucksvoll unter Beweis stellen. Das Qualitätsmanagement der Firma LAMPARTER orientiert sich an Qualitätszielen, die letztendlich in der Kundenzufriedenheit ihre Bestätigung finden. Dazu gehören Qualitätsplanung, Qualitätssicherungssysteme und -werkzeuge. Die ständige Überwachung der eigenen Prozesseffizienz gehört ebenso dazu wie die Überwachung der Prozesse und Qualitäten unserer Lieferanten und Partnerunternehmen.

LEONHARD WEISS GmbH & Co. KG

LEONHARD WEISS wurde im Jahr 1900 als reines Gleisbauunternehmen in Göppingen gegründet und hat in seiner Entwicklungsgeschichte viel in Innovationen und den technologischen Fortschritt investiert. Heute besitzt das Unternehmen zahlreiche Standorte in Deutschland und in mehreren Ländern in Nord- und Osteuropa mit über 6500 Mitarbeitern (LW-Gruppe). Das Familienunternehmen bedient Kunden in den Geschäftsfeldern Ingenieur- und Schlüsselfertigbau, Straßen- und Netzbau sowie Gleisinfrastrukturbau.

Im Ingenieurbau bietet LEONHARD WEISS Leistungen von der Beratung, Betreuung bis zur Realisierung von Bauvorhaben an und realisiert komplexe Projekte mit großen logistischen Herausforderungen. Der hauseigene IT-Bereich der Bauunternehmung bildet die Schnittstelle zwischen den eigenen Baustellen und den Herstellern aus dem Bereich der BIM-Softwareentwicklung. Diese eng verzahnte Kollaboration ermöglicht LEONHARD WEISS eine hocheffiziente Koordination der Projekte im Bereich der BIM-Planung sowie in der softwaregestützten Bauausführung, was bereits maßgeblich zum Erfolg zahlreicher Ingenieurbau-Projekte beigetragen hat.

Assoziierte Partnerschaften und projektübergreifende Kollaborationen

Deutscher Stahlbau-Verband (DStV)

Der DSTV ist die Interessenvertretung der mittelständischen deutschen Stahlbauindustrie. Die Mitglieder planen, fertigen und montieren Stahltragwerke im Hoch- und Brückenbau und bieten schlüsselfertige Leistungen an. Zu den ca. 350 Mitgliedern gehören alle namhaften deutschen Stahlbauunternehmen, Vorlieferanten und Folgegewerke, Architektur- und Ingenieurbüros sowie Hochschulen. bauforumstahl und der Deutsche Stahlbau-Verband DSTV haben sich zum 01.01.2012 zusammengeschlossen und ihre Aktivitäten in bauforumstahl gebündelt.

bauforumstahl e. V. (BFS) ist der Spitzenverband für das Bauen mit Stahl in Deutschland. Gemeinsam mit dem Deutschen Stahlbau-Verband DSTV vertritt er die Anliegen seiner Mitglieder gegenüber Politik, Fachwelt, Medien und Öffentlichkeit, bietet Wissenstransfer und engagiert sich in Forschung und Normung. Übergeordnetes Ziel ist es, die Stahlbauweise unter Berücksichtigung ganzheitlicher Aspekte wie Wirtschaftlichkeit, Sicherheit, Flexibilität und Nachhaltigkeit zu fördern. Zu den rund 350 Mitgliedern zählen alle namhaften deutschen Stahlbauunternehmen, Vorlieferanten und Folgegewerke, Architektur- und Ingenieurbüros sowie Hochschulen und Universitäten.

Autodesk

Die Fa. *Autodesk* entwickelt unter anderem Softwaresysteme für die interdisziplinäre Zusammenarbeit und Projektplanung, sowie der Entwicklung von Datenplattformen und Werkzeugen für den Bereich des Gebäudeinformationsmanagements (BIM). Als assoziierter Partner unterstützte die Fa. *Autodesk* das IoC Projekt indem die Inhalte und Ergebnisse des Projektes innerhalb eines weitreichenden Partnernetzwerkes aus BIM-Anwendern und Software-Entwicklern kommuniziert werden. Durch diese Vermittlung der Projektinhalte unterstützt die Fa. *Autodesk* die Schaffung eines *projektbegleitenden Ausschusses*.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung Internet of Construction	1
	Sigrid Brell-Cokcan, Robert H. Schmitt, Thomas Adams, Garlef Hupfer und Sören Mürker	
1.1	Herausforderungen für die Digitalisierung und Automatisierung im Bauwesen	1
1.2	Herausforderungen der unternehmensübergreifenden Kollaboration in den Fertigungsketten des Bauwesens.....	4
1.2.1	Partnerwahl und Vertragsdesign.....	5
1.2.2	Steuerung der Zusammenarbeit	5
1.2.3	Anforderungen an die unternehmensübergreifende Kollaboration im Bauwesen.....	6
1.3	Herausforderungen zur Einführung von Industrie 4.0 in das Bauwesen	8
1.4	Verortung der IoC-Ergebnisse im Referenzarchitekturmodell Bau 4.0 (RAMB 4.0)	10
1.5	Zusammenfassung der Ziele des Internet of Construction.....	13
	Literatur.....	13
2	Praktiken der Vorfertigung im Holz- und Fassadenbau	17
	Thomas Adams, Baris Cokcan, Peter Zock, Helena Annen und Maximilian Annen	
2.1	Zusammenfassung	17
2.2	Einleitung in die Entwicklung digitaler Planungs- und Fertigungsmethoden im Holzbau	18
2.3	Digitale Fertigungs- und Bauprozesse am Fallbeispiel eines mittelständischen Holzbauunternehmens.....	20
2.3.1	Firmenstruktur und Maschinenpark.....	20
2.3.2	Unternehmensinterne Prozesse für die Planung, Fertigung, Montage und Dokumentation.....	21

2.4	Neubau einer Werkhalle durch digitale Fertigungstechniken.	24
2.5	Stand der Technik digitaler Fertigungsmethoden im Holzbau.	29
2.5.1	CNC-Maschinen.	29
2.5.2	Abbundanlagen im Holzbau.	32
2.6	Datenschnittstellen und -formate im Holzbau	34
2.6.1	Digitale Planung und Fertigung	34
2.6.2	G-Code.	35
2.6.3	BTL	37
2.7	Schlussfolgerung und Ausblick	38
	Literatur.	39
3	Praktiken der Vorfertigung im Stahlbau	41
	Thomas Adams, Henning Beselbecke, Renée Schwartz und Tobias Heimig-Elschner	
3.1	Zusammenfassung	41
3.2	Einleitung in die Entwicklung digitaler Planungs- und Fertigungsmethoden im Stahlbau.	42
3.3	Digitale Fertigungs- und Bauprozesse am Fallbeispiel eines mittelständischen bis großen Stahlbauunternehmens.	44
3.3.1	Firmenstruktur und Maschinenpark.	44
3.3.2	Unternehmensinterne Prozesse für die Planung, Fertigung, Montage und Dokumentation.	46
3.4	Stand der Technik digitale Produktionseinheiten im Stahlbau.	51
3.4.1	Fertigungsverfahren im Stahlbau	51
3.4.2	Relevanz der Bearbeitungsschritte.	54
3.4.3	Bauarten von Werkzeugmaschinen	55
3.4.4	CNC-Bearbeitungszentrum	56
3.4.5	Säge-Bohranlage	57
3.4.6	Vollautomatisierte Fertigungslinien für Stahlträger.	59
3.5	Datenschnittstellen und -formate im Stahlbau.	62
3.5.1	Digitale Planung und Fertigung	62
3.5.2	DSTV-NC als Datenformat im Stahlbau	67
3.5.3	NC-Daten für den Zusammenbau	72
3.6	Schlussfolgerung und Ausblick	74
	Literatur.	75
4	Praktiken zum Informationsaustausch in den Vorfertigungsketten des Bauwesens	77
	Ursel Jansen, Adrian Koss und Jan Luca Fahrenholz	
4.1	Zusammenfassung	77
4.2	Einführung – Datenaustausch zwischen verschiedenen Firmen	78

4.3	Beschreibungen der Firmenprozesse	80
4.3.1	Prozesse der Firma I.	80
4.3.2	Prozesse der Firma II.	84
4.4	Praxisbeispiel für den Informationsaustausch	88
4.4.1	Versuchsbeschreibung	88
4.4.2	Vergleich der Modellierungsumgebungen	88
4.4.3	Datenaustausch BOCAD-3D nach Advance Steel.	90
4.4.4	Datenaustausch Advance Steel nach BOCAD-3D.	97
4.5	Schlussfolgerung und Ausblick	101
	Literatur.	101
5	Praktiken der Bauausführung – Intralogistik und Baustellenmontage. ...	103
	Peter R. Wildemann, Jan Luca Fahrenholz, Christian Hördemann, Ursel Jansen, Henning Beselbecke und Thomas Adams	
5.1	Zusammenfassung	103
5.2	Status Quo – Bauausführende Unternehmen	104
5.2.1	Projektbezogene Aufbauorganisation.	105
5.2.2	Ablauforganisation – Unternehmerisch	112
5.2.3	Ablauforganisation –Projektbezogen.	112
5.3	Ressourcentypen und Rollen im Baubetrieb	129
5.4	Der Turmdrehkran als zentrales Baugerät im Hochbau	132
5.5	Datenformat- und Schnittstellen für die Bauausführung (Ablauforganisation)	135
5.5.1	GAEB.	136
5.5.2	IFC	136
5.5.3	Fachsoftware in der Bauausführung – Closed BIM.	136
5.6	Schlussfolgerung und Ausblick	137
	Literatur.	138
6	Ein erster Ansatz zur Darstellung und Verkettung von Daten und Informationen in den Wertschöpfungsketten des Bauwesens.	141
	Elisa Lublasser, Thomas Adams und Sigrid Brell-Cokcan	
6.1	Einführung	141
6.2	Methoden zur Modellierung von Prozessen und Informationen	142
6.2.1	Prozessmodelle & Flussdiagramme.	142
6.2.2	Objektmodelle & Datenflussdiagramme	143
6.2.3	Sequenzdiagramme	144
6.3	Entwicklung eines ersten Ansatzes zur Darstellung von Informationen entlang der Fertigungsketten im Bauwesen	146
6.3.1	Vorgehen	146
6.3.2	Prozesserhebung.	147
6.3.3	Prozesslandkarte am Beispiel des IoC-Demonstrators	151

6.3.4	Erster Ansatz zur Abstrahierung von Informationen	155
6.4	Schlussfolgerung	158
	Literatur	158
7	IoC-Demonstrator zur Digitalisierung und Automatisierung	
	unternehmensübergreifender Bauprozesse	161
	Thomas Adams, Sigrid Brell-Cokcan, Peter R. Wildemann, Baris Cokcan, Christian Hördemann, Henning Beselbecke, Adrian Koss, Peter Zock und Lukas Kirner	
7.1	Zusammenfassung	162
7.2	Einleitung	162
7.3	Übersicht des IoC-Bauvorhabens	163
7.3.1	Struktur des IoC-Demonstrators	163
7.3.2	Rollen des Bauvorhabens	164
7.3.3	Standorte des Bauvorhabens	165
7.4	Planung	167
7.4.1	Entwurf	167
7.4.2	Statische Berechnung und Konstruktion	168
7.5	Arbeitsvorbereitung und Vorfertigung	180
7.5.1	Holzbau	180
7.5.2	Stahlbau	182
7.6	Bauablaufplanung und Bauausführung	183
7.6.1	Bauablaufplanung	183
7.6.2	Stahlbetonbau	186
7.6.3	Montage	190
7.7	Schlussfolgerung	199
7.8	Danksagung	199
	Literatur	199
8	Wissensabbildung und Ontologien als Erweiterung von	
	Bauinformationsmodellen	201
	Lukas Kirner und Sigrid Brell-Cokcan	
8.1	Zusammenfassung	201
8.2	Ontologien, Linked Data und das Semantic Web	202
8.2.1	Daten, Informationen und Wissen im Bauwesen	202
8.2.2	Wissen und Wissens-Management	203
8.2.3	Ontologien	204
8.2.4	Linked Data und Semantic Web	208
8.2.5	Technische Umsetzung & Standards	208
8.3	Entwicklung einer Ontologie	210
8.3.1	Etablierte Methodiken	210
8.3.2	Verfügbare Softwaretools	212
8.3.3	Evaluation von Ontologien	215

8.4	State of the Art – Ontologien im Bauwesen	216
8.4.1	Überblick und Entwicklung	216
8.4.2	Beispiel-Ontologien für das Bauwesen	216
8.5	Ontologien als Schlüsseltechnologie für das Internet of Construction	217
8.5.1	Motivation und grundsätzliche Eignung	217
8.5.2	Der prozessorientierte Ansatz des IoC	219
8.5.3	Modularität und Erweiterbarkeit für Domänen des Bauwesens	223
8.5.4	Schlussfolgerung	224
	Literatur	224
9	ioc:process – ein neuer Ansatz einer Bauprozess-Ontologie für die unternehmensübergreifende Kollaboration	229
	Lukas Kirner, Peter R. Wildemann und Sigrid Brell-Cokcan	
9.1	Zusammenfassung	229
9.2	Einleitung	230
9.2.1	Motivation	230
9.2.2	Zielsetzung und Forschungsfragen	230
9.2.3	Hypothese	236
9.3	Der Prozess in der Domäne des Bauwesens	237
9.3.1	Definitionen von Prozess und Bauprozess	237
9.3.2	Klassifizierung von Prozessen	238
9.3.3	Schlussfolgerung für die IoC Bauprozess-Ontologie	239
9.4	Ontologie-basierte Abbildung von Bauprozessen	242
9.5	IoC Bauprozess-Ontologie ioc:process	252
9.5.1	Schwerpunkt und Kompetenzfragen	252
9.5.2	Anbindung und Wiederverwendung	253
9.5.3	Grundlegender Aufbau und Konzepte	255
9.5.4	Eigenschaften der Ontologie	263
9.6	Evaluation, Anwendung und Beispiele	264
9.6.1	Beispielhafte Modellierung	264
9.6.2	Abfrage der Prozess-Informationen	270
9.6.3	Modularisierung der Wissensrepräsentation	272
9.7	Zusammenfassung	273
9.7.1	Fazit	274
9.7.2	Limitationen	274
9.7.3	Ausblick	275
	Literatur	275

10	ioc:cro Ressourcenontologie – Eine Ontologie für Baugeräte IoC	
	Construction Resource Ontology	279
	Peter R. Wildemann, Sören Münker, Lukas Kirner, Jonas Mackh und Sigrid Brell-Cokcan	
10.1	Zusammenfassung	279
10.2	Einführung	280
	10.2.1 Motivation	280
	10.2.2 Zielsetzung und Forschungsfragen	280
	10.2.3 Definitionen	281
10.3	Einsatz und digitale Repräsentation von Baugeräten	282
	10.3.1 Prozesse und Herausforderungen im Umgang mit Baugeräten	282
	10.3.2 Status Quo – Aktuelle Ressourcenbeschreibungen	285
	10.3.3 Anforderungen	288
	10.3.4 Bewertung des Stands der Technik	290
	10.3.5 Hypothese	291
10.4	Die Ressourcenontologie	291
	10.4.1 Methode	291
	10.4.2 Entwicklung der Ontologie	291
10.5	Beispiele, Evaluation und Anwendung der Ontologie	312
	10.5.1 Beispielhafte Modellierung und Abfrage	312
	10.5.2 Anforderungsabgleich	316
10.6	Anwendung der Ressourcenontologie	316
	10.6.1 Anlage eines digitalen Baugeräte-Zwillings	317
	10.6.2 Nutzung eines digitalen Baugeräte-Zwillings	318
	10.6.3 Datenweitzernutzung	319
	10.6.4 Nutzung der Daten in Fachtools	320
10.7	Zusammenfassung/Ergebnisse	321
	10.7.1 Fazit	321
	10.7.2 Limitationen und Ausblick	322
	Literatur	322
11	ioc:location – Eine Ontologie für die Verortung raumbezogener	
	Bauprozessdaten	325
	Bernward Hoffmann, Lukas Kirner und Sigrid Brell-Cokcan	
11.1	Zusammenfassung	326
11.2	Problemstellung	326
11.3	Stand der Technik	327
	11.3.1 Wichtige Arbeiten	327
	11.3.2 Ansätze zur Beschreibung von Geometrien im <i>Semantic</i> <i>Web</i> -Kontext	328

11.4	Bewertung bisheriger Lösungsansätze	333
11.5	Vorgehensweise	334
11.6	Ontologie	334
11.6.1	Ontologieentwicklung	334
11.6.2	Aufbau der Ontologie.	336
11.6.3	Detaillierte Beschreibung relevanter Klassen	344
11.7	Validierung und Iteration der Ontologie anhand eines Use Cases	346
11.7.1	Theoretischer Use Case	346
11.7.2	Umsetzung und Implementierung des Use Cases	348
11.7.3	Automatisierte Topologieermittlung	349
11.8	Planungstool für die Baustelleneinrichtung	361
11.8.1	Abfragen der aktuellen Baustellensituation	361
11.8.2	Zone erstellen oder aktualisieren	362
11.8.3	Element erstellen oder aktualisieren	364
11.8.4	Anzeigen des zeitlichen Ablaufs und Analyse einzelner Elemente.	365
11.8.5	Bauteilnachverfolgung und Sicherheitstracking	366
11.8.6	Augmented Reality-Applikation	367
11.9	Beitrag zum aktuellen Stand der Technik.	370
11.10	Zusammenfassung	371
	Literatur.	372
12	ioc:process -Technische Umsetzung und praktische Anwendung der entwickelten Konzepte	375
	Lukas Kirner und Sigrid Brell-Cokcan	
12.1	Zusammenfassung	375
12.2	Ontologie und Datenmodell	376
12.2.1	Modellierung der Ontologie.	376
12.2.2	Dokumentation.	377
12.2.3	Triple Store Implementierung	377
12.3	Systemarchitektur und Core	382
12.3.1	Grundkonzept.	382
12.3.2	Aufbau des IoC-Core	385
12.3.3	Orchestrierung und Containerisierung	387
12.3.4	Benutzerkontensteuerung.	388
12.4	API	388
12.4.1	Struktur, Anfrage-logik und Antwortformung.	388
12.4.2	Dokumentation.	391
12.4.3	Evaluierung und Performance	392

12.5	Anbindungen und Mappings	395
12.5.1	Sharepoint	397
12.5.2	eingesetzte Konverter	398
12.5.3	Evaluierte Dateiformate	400
12.5.4	Internet of Things (IoT) Ansätze via MQTT	411
12.6	Entwickelte Tools und Werkzeuge	412
12.6.1	Grasshopper-Plugin „Starfrog“	412
12.6.2	Modellierungsumgebung via Litegraph	416
12.7	Demonstratoren	418
12.7.1	Fertigung NC-Demonstrator (AG Fertigung)	418
12.7.2	Prozesskette IoC Demonstrator (AG Intralogistik & AG Montage)	422
12.7.3	AR Aufbau Baufortschrittserfassung/Locations (AG Netzwerk)	430
12.8	Schlüsse aus technischer Umsetzung	432
12.9	Ausblick und zukünftige Forschung	433
12.9.1	Federated Queries	433
12.9.2	Datensicherheit und Datenqualität	434
12.9.3	Entwicklung von Plugins und Anbindungen für etablierte Werkzeuge	434
12.9.4	Regelbasierte Verarbeitung mit SHACL	434
	Literatur	435
13	Konfigurierbare Arbeitsräume und Robotik als Basis der Automatisierung in der Vorfertigung des Bauwesens	437
	Sven Stumm, Ajith Krishnan und Sigrid Brell-Cokcan	
13.1	Zusammenfassung	437
13.2	Einleitung	438
13.3	Grundlagen der Robotik	440
13.4	Steuerung serielle Gelenkarmroboter	443
13.5	Mobile Roboter Steuerung	444
13.6	Navigation mobiler Roboter und Registrierung	446
13.7	Grundlagen der Robotersteuerung	449
13.7.1	CAD-basierte Robotersteuerung	451
13.7.2	Weiterer Methoden der Robotersteuerung	455
13.8	Kommunikationsebene der Industrie 4.0	456
13.8.1	Message Queuing Telemetry Transport – MQTT	458
13.8.2	Quality of Service – QoS	460
13.8.3	Data Distribution Service – DDS	461
13.8.4	Open Platform Communications Unified Architecture – OPC UA	463

13.9	Schlussfolgerungen	464
	Literatur	466
14	Flexible roboterbasierte Produktion	469
	Martin Feustel, Sven Stumm, Juan David Munoz Osorio und Mario Daniele Fiore	
14.1	Einleitung	469
14.2	Prozessbasierte Aufgabenbeschreibung	470
14.3	Limitierung der Programmierung von Industrierobotern für prozessbasierte Aufgabenbeschreibung	472
14.4	Aufgabenbeschreibung basierend auf unterbestimmten Frames	473
14.5	Aufgabenbeschreibung basierend auf geometrischen Primitiven und Constraints	475
14.6	Constraint-Solver für Aufgabenbeschreibungen	481
14.7	Taskinterpreter – Interpreter für Aufgabenbeschreibungen	484
14.8	Kollisionsvermeidung	488
14.9	Smart Motion Generator – Von der Aufgabenbeschreibung zur Roboterbewegung	491
14.10	Evaluation des Smart Motion Generators	495
14.11	Schlussfolgerung	502
	Literatur	502
15	Roboterassistiertes Schweißen – Verteilte Produktionstechnik für dynamische Automatisierung	505
	Sven Stumm, Ethan Kerber und Ajith Krishnan	
15.1	Zusammenfassung	505
15.2	Einleitung	506
15.3	Cloud Remote Control	508
	15.3.1 M2M/crc eine Industrie 4.0 Kommunikationsebene	511
	15.3.2 Cloud Remote Anbindung	522
	15.3.3 Nutzerschnittstellen und haptische Roboterprogrammierung im CRC	524
	15.3.4 Dynamische Automatisierungskomponenten in der Praxis	528
	15.3.5 Mobile Robotik in der Praxis	532
15.4	Prozessbasierte roboterassistierte Anlagen in der Praxis	539
	15.4.1 Anlagenkonzeptentwicklung der IoC Roboterdemonstratoren	540
	15.4.2 Roboterprozessentwicklung auf Basis von DSTV-NC	542
	15.4.3 Roboterprozessentwicklung auf Basis von BTL	544
	15.4.4 Anbindung und Orchestrierung mit der IoC- Bauprozessontologie	548

15.5	Roboter-gestütztes Schweißen am Zusammenbaudemonstrator	550
15.5.1	Prozessentwicklung für die roboter-gestützte Schweißanlage im Zusammenbau komplexer Stahlbaugruppen.	550
15.5.2	Mobile kollaborative Robotik für die Stahlmontage	554
15.5.3	Sensoren und haptische Robotik in der Benutzerinteraktion	558
15.5.4	Industrialisierung der Cloud-Fernsteuerung	561
15.6	Ergebnisdiskussion & Schlussfolgerungen	564
	Literatur.	565
16	Roboter-gestütztes Schrauben – Endeffektor-basierte Sensorsysteme für mobile Roboter	567
	Sören Münker, Lukas Schäper, Jan Strehl, Amon Göppert und Robert H. Schmitt	
16.1	Zusammenfassung	567
16.2	Einführung	568
16.3	Registrierung von Punktwolken zur Lokalisierung von Komponenten	569
16.3.1	Ansatz für die Posenerkennung	569
16.3.2	Testbauteil	570
16.3.3	Preprocessing Pipeline.	570
16.3.4	Iterative Posenerkennung.	572
16.3.5	Validierung mit mobilem Roboter.	572
16.3.6	Zwischenfazit.	573
16.4	Whole-body Motion Planning für die Montage mit mobilen Robotern.	574
16.4.1	Konzept des Whole-body Motion Plannings mit stochastischem Planer	575
16.4.2	Benchmarking von Planungsalgorithmen für virtuelle Planungsprobleme	576
16.4.3	Validierung in der Laborumgebung.	577
16.4.4	Zwischenfazit.	579
16.5	Mobile Koordinatenmessmaschine für den Stahlbau.	580
16.5.1	Konstruktion des iGPS Messtaster-Endeffektors.	581
16.5.2	Software-Konzept	582
16.5.3	Validierungsversuche.	584
16.5.4	Ergebnisse und Zwischenfazit	585
16.6	Zusammenfassung und Ausblick	586
	Literatur.	587

17 Intralogistik – Materialflussoptimierung der baubetrieblichen	
Intralogistik im Hochbau	589
Sören Münker, Peter R. Wildemann, Maximilian Buxel, Amon Göppert und Robert H. Schmitt	
17.1 Zusammenfassung	589
17.2 Einleitung	590
17.3 Stand der Technik	591
17.4 Konzept der Materialflussoptimierung	595
17.5 Diskrete Optimierung der mehrstufigen Materialbereitstellung	598
17.6 Validierung anhand des IoC Demonstrators	609
17.7 Schlussfolgerung und Ausblick	613
Literatur	614
18 Intralogistik – Durchlaufzeitoptimierung in der baubetrieblichen	
Ressourceneinsatzplanung unter Verwendung von	
Montagevorranggraphen	615
Sören Münker, Peter R. Wildemann, Amon Göppert und Robert H. Schmitt	
18.1 Zusammenfassung	615
18.2 Einführung	616
18.3 Framework zur automatischen Durchlaufzeitoptimierung	618
18.4 Durchlaufzeitoptimierung im Job-Scheduling-Modul	621
18.5 Validierung auf der Referenzbaustelle	623
18.6 Schlussfolgerung und Ausblick	626
Literatur	626
19 Intralogistik – Assetmanagement und -lokalisierung in der	
Wertschöpfungskette Bau	629
Peter R. Wildemann und Sigrid Brell-Cokcan	
19.1 Zusammenfassung	629
19.2 Notwendigkeit der Lokalisierung im Baubetrieb	630
19.3 Status Quo – Lokalisierung von Assets im Baubetrieb	631
19.3.1 Wichtige Begriffsdefinitionen	631
19.3.2 State of the Art: Lokalisierungsmethoden	632
19.4 State of the Art: (Funk-) Technologien	638
19.4.1 Globale Positionsbestimmung in GPS durch GNSS	638
19.4.2 Lokale Positionsbestimmung in LPS	639
19.5 Use Cases und ihre Anforderungen	647
19.5.1 Allgemeine Anforderungs-Erhebung	647
19.5.2 Use Cases im IoC	647
19.6 Versuchsaufbau IoC-Demonstrator	652
19.6.1 Verwendete System-Komponenten	652
19.6.2 Gewählte Basisarchitektur des IoT-Systems	657

19.6.3	Übergreifendes Setup für Use Case 1 und 2 – Definition der Lokationen	659
19.6.4	Use Case 1: Versuchsaufbau – Transportlogistik	659
19.6.5	Konzeptidee am Übergang zwischen Use Case 1 und 2	663
19.6.6	Use Case 2: Versuchsaufbau – Baustellenlogistik	664
19.7	Ergebnisse und Validierung	667
19.7.1	Use Case 1	667
19.7.2	Use Case 2	668
19.8	Schlussfolgerung	673
19.8.1	Zusammenfassung und Fazit	673
19.8.2	Limitationen und Ausblick	673
	Literatur	680
20	Methoden zur Digitalisierung von Baustellenprozessen durch Punktwolken	685
	Jan Luca Fahrenholz, Thomas Adams und Peter R. Wildemann	
20.1	Zusammenfassung	685
20.2	Einführung	686
20.3	Grundlagen des Laserscannings	687
20.3.1	Laserscanning und LiDAR	687
20.3.2	Photogrammetrie	689
20.4	Fallbeispiele	692
20.4.1	Baustellenerfassung mit Krankamera	692
20.4.2	Baustellenerfassung mit Tablet-PC und RTK-Antenne	697
20.4.3	Baustellenerfassung mit dem terrestrischen Laserscanner	700
20.5	Punktwolkenvergleich von mobilem Endgerät und terrestrischen Laserscanner	706
20.5.1	Vergleichsverfahren	706
20.5.2	Punktwolkenvergleich der Krankameraaufnahmen	706
20.5.3	Punktwolkenvergleich der Tablet PC-Aufnahmen	708
20.5.4	Punktwolkenvergleich der terrestrischen Laserscans	708
20.5.5	Gegenüberstellung der Messverfahren	712
20.6	Schlussfolgerung	713
	Literatur	714
21	Grundlagen zur automatisierten Baufortschrittsüberwachung mittels Deep Learning basierend auf Punktwolken und Bauinformationsmodellen und Sigrid Brell-Cokcan	717
	Jan Luca Fahrenholz und Sigrid Brell-Cokcan	
21.1	Zusammenfassung	717
21.2	Einführung	717

21.3	Stand der Technik – Visuelle Baufortschrittsüberwachung	719
21.3.1	3D-Punktwolken als Zustandsaufnahmen	721
21.3.2	Registrierung von Punktwolken	722
21.3.3	Datenverarbeitung und Erkennung von Bauelementen	733
21.3.4	Anwendung mit Deep Learning	745
21.4	Fazit	752
	Literatur	753
22	Entwicklung und Umsetzung einer automatisierten Baufortschrittsüberwachung mittels Deep Learning basierend auf Punktwolken und Bauinformationsmodellen	765
	Jan Luca Fahrenholz, Lukas Kirner und Sigrid Brell-Cokcan	
22.1	Zusammenfassung	765
22.2	Einführung	766
22.3	Entwicklung der Baufortschrittsüberwachung	767
22.3.1	Anforderungs- und Zieldefinition	767
22.3.2	Konzept und Implementierung	769
22.4	Ergebnisse	797
22.4.1	Validierung anhand Fallstudie 1: Modellausschnitt eines realen Bauobjektes	798
22.4.2	Ergebnisse der Fallstudie 2: IoC-Demonstrator	808
22.4.3	Ergebnisse der Fallstudie 3: IoC-Stahlbau	809
22.5	Fazit und Ausblick	813
	Literatur	814
23	Baustellenassistenzsystem: Dynamischer Assistent zur Prozessunterstützung an der Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine	817
	Peter R. Wildemann, Jonas Mackh, Christian Hördemann, Michael Kreger, Lukas Kirner, Ursel Jansen und Henning Beselbecke	
23.1	Zusammenfassung	817
23.2	Einleitung	818
23.3	Status Quo für Baustellenassistenzsysteme	818
23.4	Anforderungen an ein gekoppeltes Baustellenassistenzsystem	820
23.5	Konzept	821
23.5.1	Modellierung der Informationsbedarfe mittels User Stories	822
23.5.2	Visualisierung der Konzepte des Baustellenassistenten	830
23.5.3	Darstellung der Prozesse im BPMN	833
23.6	Umsetzung und Ergebnis	836
23.6.1	Architektur des Baustellenassistenten	836
23.6.2	Bedienoberfläche des Baustellenassistenten	838

23.6.3	Einbindung von Turmdrehkranmodellen im Baustellenassistenten	845
23.6.4	Untersuchung des Assistenzsystems im Baustellenbetrieb. . .	847
23.7	Schlussfolgerung	849
23.8	Fazit	852
	Literatur	852
24	Baukosten – wirtschaftliche Potenziale zentralisierter Datenplattformen für den Informationsaustausch in Bauprojekten	855
	Garlef Hupfer	
24.1	Zusammenfassung	855
24.2	Einführung	856
24.3	Probleme im Informationsfluss	856
24.4	Bewertung des aktuellen Informationsaustauschs	859
24.4.1	Konzeption des Fragebogens	860
24.4.2	Ergebnisse	862
24.5	Schlussfolgerung und Ausblick	868
	Literatur	868
25	Baukosten – Quantifizierung der Kosten durch suboptimale Informationsflüsse	871
	Garlef Hupfer und Jana Wendig	
25.1	Zusammenfassung	871
25.2	Einführung	872
25.3	Simulation von Projektabläufen	873
25.3.1	Erstellung eines Projektlogs mit SpiffWorkflow	874
25.3.2	Erstellung von suboptimalen Projektlogs	876
25.4	Analyse der Auswirkungen suboptimaler Informationsflüsse	880
25.5	Zusammenfassung	882
	Literatur	883
26	Baukosten – Wirtschaftlichkeitsanalyse unternehmensübergreifender Kollaboration in den Fertigungsketten des Bauwesens	885
	Garlef Hupfer	
26.1	Zusammenfassung	885
26.2	Einführung	886
26.3	Datenverbindungen	887
26.4	Mechanismen des Dashboards	889
26.5	Verwendung über den Projektzyklus hinweg	893
26.6	Zusammenfassung	895
	Literatur	896
	Stichwortverzeichnis	899