

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung Internet of Construction</b>	<b>1</b>
	Sigrid Brell-Cokcan, Robert H. Schmitt, Thomas Adams, Garlef Hupfer und Sören Münker	
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
<b>2</b>	<b>Praktiken der Vorfertigung im Holz- und Fassadenbau</b>	<b>17</b>
	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
<b>3</b>	<b>Praktiken der Vorfertigung im Stahlbau . . . . .</b>	<b>41</b>
	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
<b>4</b>	<b>Praktiken zum Informationsaustausch in den Vorfertigungsketten des Bauwesens . . . . .</b>	<b>77</b>
	Ursel Jansen, Adrian Koss und Jan Luca Fahrendholz	
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
<b>5</b>	<b>Praktiken der Bauausführung – Intralogistik und Baustellenmontage. . .</b>	<b>103</b>
	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
<b>6</b>	<b>Ein erster Ansatz zur Darstellung und Verkettung von Daten und Informationen in den Wertschöpfungsketten des Bauwesens. . . . .</b>	<b>141</b>
	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	<b>IoC-Demonstrator zur Digitalisierung und Automatisierung unternehmensübergreifender Bauprozesse . . . . .</b>	<b>161</b>
	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	<b>Wissensabbildung und Ontologien als Erweiterung von Bauinformationsmodellen . . . . .</b>	<b>201</b>
	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	<b>ioc:process – ein neuer Ansatz einer Bauprozess-Ontologie für die unternehmensübergreifende Kollaboration . . . . .</b>	<b>229</b>
	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

<b>10 ioc:cro Ressourcenontologie – Eine Ontologie für Baugeräte IoC</b>	
<b>Construction Resource Ontology</b> . . . . .	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 Datenweiternutzung . . . . .	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
<b>11 ioc:location – Eine Ontologie für die Verortung raumbezogener Bauprozessdaten</b> . . . . .	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 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
<b>12</b>	<b>ioc:process -Technische Umsetzung und praktische Anwendung der entwickelten Konzepte. . . . .</b>	<b>375</b>
	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, Anfragelogik 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
<b>13</b>	<b>Konfigurierbare Arbeitsräume und Robotik als Basis der Automatisierung in der Vorfertigung des Bauwesens .....</b>	<b>437</b>
	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
<b>14</b>	<b>Flexible roboterbasierte Produktion .....</b>	<b>469</b>
	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
<b>15</b>	<b>Roboterassistiertes Schweißen – Verteilte Produktionstechnik für dynamische Automatisierung. ....</b>	<b>505</b>
	Sven Stumm, Ethan Kerber und Ajith Krishnan	
15.1	Zusammenfassung .....	505
15.2	Einleitung .....	506
15.3	Cloud Remote Control .....	508
15.3.1	M2Mlrc 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 Zusammenbaudemondemonstrator . . . . .	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
<b>16</b>	<b>Roboter-gestütztes Schrauben – Endeffektor-basierte Sensorsysteme für mobile Roboter . . . . .</b>	<b>567</b>
	Sören Munker, 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
<b>20</b>	<b>Methoden zur Digitalisierung von Baustellenprozessen durch Punktwolken . . . . .</b>	<b>685</b>
	Jan Luca Fahrendholz, 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
<b>21</b>	<b>Grundlagen zur automatisierten Baufortschrittsüberwachung mittels Deep Learning basierend auf Punktwolken und Bauinformationsmodellen und Sigrid Brell-Cokcan . . . . .</b>	<b>717</b>
	Jan Luca Fahrendholz 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	<b>Entwicklung und Umsetzung einer automatisierten Baufortschrittsüberwachung mittels Deep Learning basierend auf Punktwolken und Bauinformationsmodellen . . . . .</b>	<b>765</b>
	Jan Luca Fahrendholz, 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	<b>Baustellenassistenzsystem: Dynamischer Assistent zur Prozessunterstützung an der Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine . . . . .</b>	<b>817</b>
	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	Bedieneroberfläche 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
<b>24</b>	<b>Baukosten – wirtschaftliche Potenziale zentralisierter Datenplattformen für den Informationsaustausch in Bauprojekten . . . . .</b>	<b>855</b>
	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
<b>25</b>	<b>Baukosten – Quantifizierung der Kosten durch suboptimale Informationsflüsse . . . . .</b>	<b>871</b>
	Garlef Hupfer und Jana Wendig	
25.1	Zusammenfassung . . . . .	871
25.2	Einführung . . . . .	872
25.3	Simulation von Projektablaufen . . . . .	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
<b>26</b>	<b>Baukosten – Wirtschaftlichkeitsanalyse unternehmensübergreifender Kollaboration in den Fertigungsketten des Bauwesens. . . . .</b>	<b>885</b>
	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
	<b>Stichwortverzeichnis. . . . .</b>	<b>899</b>