

Matthias Ebade Esfahani

Ontologie der Fabrikplanung mit Hilfe von Building Information Modeling (BIM)



Ontologie der Fabrikplanung mit Hilfe von Building Information Modeling (BIM)

Ontology of Factory Planning through Building Information Modeling (BIM)

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Matthias Aref Ebade Esfahani

Berichter/in:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing Günther Schuh
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Burggräf, MBA

Tag der mündlichen Prüfung: 25. April 2022

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Matthias Ebade Esfahani

Ontologie der Fabrikplanung mit Hilfe von
Building Information Modeling (BIM)

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. T. Bergs
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. G. Schuh
Prof. Dr.-Ing. C. Brecher
Prof. Dr.-Ing. R. H. Schmitt

Band 25/2022



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Matthias Ebade Esfahani:

Ontologie der Fabrikplanung mit Hilfe von Building Information Modeling (BIM)

1. Auflage, 2022

Apprimus Verlag, Aachen, 2022

Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien
an der RWTH Aachen

Steinbachstr. 25, 52074 Aachen

Internet: www.apprimus-verlag.de, E-Mail: info@apprimus-verlag.de

ISBN 978-3-98555-089-0

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2022)

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktionssystematik des Werkzeugmaschinenlabors WZL der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen.

Herrn Professor Günther Schuh danke ich für die Möglichkeit zur Promotion. Herrn Professor Peter Burggräf danke ich für die Übernahme des Korreferats. Frau Professorin Katharina Schmitz möchte ich meinen Dank für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und Herrn Professor Eike Stumpf für die Übernahme des Prüfungsbeisitzes aussprechen.

Für die inhaltliche Betreuung und Unterstützung bei meiner Dissertation möchte ich mich bei Personen aus meinem nahen Umfeld bedanken. Meinen Kolleginnen und Kollegen aus der Abteilung Fabrikplanung möchte ich meinen herzlichen Dank aussprechen für die intensive, vertrauensvolle und wirklich auch lustige Zeit. Insbesondere möchte ich Herrn Dr. Matthias Danapfel hervorheben, bei dem ich nicht nur bereits als studentische Hilfskraft Erfahrung sammeln konnte, sondern der mich als Oberingenieur über die vergangenen Jahre inhaltlich eng betreut, mir zahlreiche hilfreiche Tipps zur Erstellung der Dissertation gegeben und viel Vertrauen geschenkt hat. Seinem Nachfolger Tobias Adlon möchte ich ebenfalls danken, der mich speziell während der Prüfungsvorbereitung bei der Dissertation unterstützt hat, aber auch darüber hinaus eine wichtige Vertrauensperson während meiner Zeit am WZL war. Weiterhin möchte ich die studentischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sowie Abschlussarbeiterinnen und Abschlussarbeiter hervorheben, die mich bei meiner Dissertation unterstützt haben und mir immer als Diskussionspartner zur Verfügung standen. Für die außergewöhnliche Hilfsbereitschaft bedanke ich mich bei: Stephan Matoni, Nora Schwamborn, Svea Wrede, Corinna Geukes, Marius Groß und Daniel Cäsar.

Durch das gemeinsame Studium und die folgende Dissertationszeit sind enge Freundschaften entstanden, die vermutlich fürs Leben halten. Ich danke Hannes Kahmann und Carsten Fölling für den Rückhalt über die gesamte Zeit. Ebenso danke ich meiner tollen Gruppe Werksstrukturplanung für die unvergesslichen Erlebnisse: Jonas Dackweiler, Jan Salzwedel, Steffen Schupp und Tingni Xu.

Zuletzt gebührt der Dank meinen Eltern, die mir den Weg zur Promotion mit dem Studium erst ermöglicht haben. Weiterhin danke ich meiner Frau Patricia Schmitz für die unermüdliche Unterstützung, die aufbauenden Worte sowie die Geduld, die sie mir entgegengebracht hat.

Inhaltsübersicht

Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis.....	XI
Formelverzeichnis	XV
Formelzeichenverzeichnis.....	XVII
Abkürzungsverzeichnis	XIX
Zusammenfassung	XXIII
Summary.....	XXV
1 Einführung	1
1.1 Zielsetzung der Forschungsarbeit.....	2
1.2 Design Science Research als Forschungsmethodik	3
1.3 Struktureller Aufbau der Arbeit	5
2 Grundlagen und Herausforderungen der BIM-basierten	
Fabrikplanung.....	9
2.1 Einführung in die BIM-basierte Fabrikplanung.....	10
2.2 Die Planungsschnittstelle zwischen TGA und Produktion.....	15
2.3 Planerische Herausforderungen an der Schnittstelle zwischen Produktions- und TGA-Planung	22
2.4 Abgeleiteter Entwicklungsbedarf der BIM-basierten Fabrikplanung	26
3 Ansätze zur Optimierung von datenbasierten BIM-Planungs- und	
-Prüfprozessen	29
3.1 Methodik zur Untersuchung der Ansätze	30
3.2 Bestehende Ansätze zur Weiterentwicklung der BIM-basierten Fabrikplanung	33

3.3	Das Resource Description Framework (RDF) und die Web Ontology Language (OWL).....	50
3.4	buildingSMART-Standards und ihre Anwendung im Building Information Modeling	57
3.5	Darstellung des Forschungsbedarfs.....	64
4	Methodik zur automatischen Planungsvalidierung im BIM-basierten Fabrikplanungsprozess	69
4.1	Anforderungen an die Methodik	70
4.2	Darstellung der Lösungsartefakte als Lösungsthese zur durchgängigen Planung und automatischen Planungsvalidierung.....	75
4.3	Evaluation der Lösungsthese zur automatischen Validierung.....	82
5	Ausgestaltung der Methodik	89
5.1	OFP – Ontology for Factory Planning.....	89
5.2	Factory Planning IDM zur Operationalisierung der OFP.....	124
5.3	Erstellung von ontologiebasierten Prüffregeln zur Validierung der Planungs-Deliveries.....	139
6	Testing und Evaluation der Methodik.....	167
6.1	Einführung in den Use-Case	168
6.2	Experimentaufbau	170
6.3	Durchführung und Ergebnisse.....	181
6.4	Diskussion und kritische Reflexion	189
7	Zusammenfassung und Ausblick	199
8	Literaturverzeichnis	201
9	Anhang	217
9.1	Darstellung der Expertenstudie	217
9.2	Darstellung der HOAI-Phasen.....	220
9.3	Darstellung der Methodik der Literaturrecherche.....	223
9.4	Beschreibung von Einzelschritten zur Ontologie-Erstellung (Methontology)	229
9.5	Weitergehende Details zum IDM.....	248
9.6	Weitergehende Details und Informationen zur <i>Constraint View</i>	256
9.7	Modelltheorie	266
9.8	Theorie zum Experiment	266
9.9	Details zum durchgeführten Experiment	267

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis.....	XI
Formelverzeichnis	XV
Formelzeichenverzeichnis.....	XVII
Abkürzungsverzeichnis	XIX
Zusammenfassung	XXIII
Summary.....	XXV
1 Einführung	1
1.1 Zielsetzung der Forschungsarbeit.....	2
1.2 Design Science Research als Forschungsmethodik	3
1.3 Struktureller Aufbau der Arbeit	5
2 Grundlagen und Herausforderungen der BIM-basierten	
Fabrikplanung.....	9
2.1 Einführung in die BIM-basierte Fabrikplanung.....	10
2.2 Die Planungsschnittstelle zwischen TGA und Produktion.....	15
2.3 Planerische Herausforderungen an der Schnittstelle zwischen Produktions- und TGA-Planung	22
2.3.1 Darstellung des Erkenntnisprozesses zur Identifikation derzeitiger Hürden im Forschungsbereich	22
2.3.2 Nicht durchgängige Planungsinformationen	23
2.3.3 Asynchroner Planungsprozess	24
2.4 Abgeleiteter Entwicklungsbedarf der BIM-basierten Fabrikplanung	26

3	Ansätze zur Optimierung von datenbasierten BIM-Planungs- und -Prüfprozessen	29
3.1	Methodik zur Untersuchung der Ansätze	30
3.2	Bestehende Ansätze zur Weiterentwicklung der BIM-basierten Fabrikplanung	33
3.2.1	Vorstellung bestehender Ansätze	34
3.2.2	Bewertung und kritische Würdigung der Ansätze zur Lösung des Praxisproblems	40
3.3	Das Resource Description Framework (RDF) und die Web Ontology Language (OWL).....	50
3.4	buildingSMART-Standards und ihre Anwendung im Building Information Modeling	57
3.4.1	Inhalt und Komponenten eines IDM	59
3.4.2	Entwicklungsprozess eines IDM.....	62
3.4.3	Anwendung der buildingSMART-Standards in der heutigen Praxis	63
3.5	Darstellung des Forschungsbedarfs.....	64
4	Methodik zur automatischen Planungsvalidierung im BIM-basierten Fabrikplanungsprozess	69
4.1	Anforderungen an die Methodik	70
4.1.1	Methodische Anforderungen.....	70
4.1.2	Inhaltliche Anforderungen.....	71
4.1.3	Formale Anforderungen.....	74
4.2	Darstellung der Lösungsartefakte als Lösungsthese zur durchgängigen Planung und automatischen Planungsvalidierung.....	75
4.3	Evaluation der Lösungsthese zur automatischen Validierung.....	82
5	Ausgestaltung der Methodik	89
5.1	OFP – Ontology for Factory Planning.....	89
5.1.1	Factory Design Ontology Requirements Specification Document (Factory-ORSD).....	90
5.1.2	Konzeptionierung der OFP.....	95
5.1.3	Integration bestehender Ontologien	100
5.1.4	Detailbeschreibung der OFP.....	105
5.2	Factory Planning IDM zur Operationalisierung der OFP.....	124
5.2.1	Entwicklungsprozess des FP-IDM.....	125
5.2.2	Das Prozessmodell des FP-IDM	126
5.2.3	Informationsaustauschanforderungen des FP-IDM.....	133

5.3	Erstellung von ontologiebasierten Prüfregeln zur Validierung der Planungs-Deliveries	139
5.3.1	Aufstellung relevanter Regelkategorien	140
5.3.2	Auswahl einer geeigneten Regelsprache	141
5.3.3	Umsetzung der Regelkategorien in SHACL	147
5.3.4	Umsetzung der SHACL-Regeln in Protégé.....	163
6	Testing und Evaluation der Methodik	167
6.1	Einführung in den Use-Case	168
6.2	Experimentaufbau	170
6.2.1	Vorstellung des konkreten Ausschnitts der Lösungsthese zur automatischen Validierung von Planungsinformationen	173
6.2.2	Vorstellung des manuellen Vergleichsvorgehens	180
6.3	Durchführung und Ergebnisse	181
6.3.1	Erläuterung des Evaluationsverfahrens mittels des Fi-Scores.....	181
6.3.2	Durchführung, Auswertung und Ergebnisse	182
6.4	Diskussion und kritische Reflexion	189
6.4.1	Kritische Reflexion der Forschungsmethodik	189
6.4.2	Evaluation der Anforderungen an das Lösungskonzept.....	190
6.4.3	Kritische Reflexion des Lösungskonzepts	194
7	Zusammenfassung und Ausblick	199
8	Literaturverzeichnis.....	201
9	Anhang	217
9.1	Darstellung der Expertenstudie	217
9.2	Darstellung der HOAI-Phasen.....	220
9.3	Darstellung der Methodik der Literaturrecherche.....	223
9.3.1	Taxonomie nach Cooper	223
9.3.2	Schlagworte der Literaturrecherche	224
9.3.3	Recherchekonzeption nach der STARLITE-Mnemonik.....	226
9.3.4	Literaturanalyse nach der PRISMA-Methodik.....	227
9.3.5	Literaturanalyse nach MAYRING sowie HSIEH UND SHANNON.....	228
9.4	Beschreibung von Einzelschritten zur Ontologie-Erstellung (Methontology)	229
9.4.1	Wissenserwerb	229
9.4.2	Theoretischer Aufbau eines ORSD	230
9.4.3	Details zum ORSD der vorliegenden Ontologie.....	235
9.4.4	Theorie der Konzeptionierung.....	235

9.4.5	Weiterführende Informationen zur Konzeptionierung der vorliegenden Ontologie.....	238
9.4.6	Theorie zur Integration.....	239
9.4.7	Weiterführende Informationen zu den integrierten Elementen von BÜSCHER	242
9.4.8	Vollständiges Integrationsdokument.....	244
9.4.9	Theorie der Implementierung	245
9.4.10	Durchführung der Implementierung der vorliegenden Zielontologie.....	245
9.4.11	Theorie der Evaluation.....	247
9.4.12	Durchführung der Evaluation der vorliegenden Ontologie	247
9.5	Weitergehende Details zum IDM.....	248
9.5.1	Definition der LOG und LOI	248
9.5.2	Weiteres Beispiel einer konkreten IAA des FP-IDM.....	252
9.6	Weitergehende Details und Informationen zur <i>Constraint View</i>	256
9.6.1	Weitergehende Beschreibung von SHACL	256
9.6.2	Code-Beispiele für Validierungen mit den jeweiligen Sprachen.....	257
9.6.3	Erläuterung der K.O.-Kriterien zur Bewertung der Validierungssprachen	259
9.6.4	Erläuterung der Wunsch-Kriterien zur Bewertung der Validierungssprachen	261
9.6.5	Weitere Code-Beispiele der <i>Constraint View</i>	264
9.6.6	Herausforderungen bei Validierungsbericht mit SHACL-SPARQL.....	265
9.7	Modelltheorie.....	266
9.8	Theorie zum Experiment	266
9.9	Details zum durchgeführten Experiment.....	267
9.9.1	Definierte AIA.....	267
9.9.2	Konstruktionszeichnungen des Modells.....	270
9.9.3	Datenblätter der Anlagen.....	272
9.9.4	Zur Verfügung gestellte Formelsammlung.....	274
9.9.5	Liste aller Modellobjekte.....	276
9.9.6	Exportierte Bauteilliste.....	278
9.9.7	Cellfie Skript zur Transformation (Parsing)	283
9.9.8	SHACL-Skript.....	283
9.9.9	Ergebnisse pro Fehler	283
9.9.10	Gesamter Validation Report	284

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Rahmen der Design Science Research als Forschungsmethodik	4
Abbildung 1-2:	Aufbau der Forschungsarbeit auf Basis der DSR	6
Abbildung 1-3:	Linearisierte DSR-Struktur der vorliegenden Arbeit	7
Abbildung 2-1:	Einordnung des Kapitels 2 in den Rahmen der DSR.....	10
Abbildung 2-2:	Beispielhafter Auszug aus dem Vernetzungsmodell des Aachener Fabrikplanungsvorgehens	13
Abbildung 2-3:	Kostengruppe 400 der DIN276.....	17
Abbildung 2-4:	Synergetische Fabrikplanung nach WIENDAHL.....	19
Abbildung 2-5:	Überblick über zu regelnde Parameter im Reinraum	21
Abbildung 3-1:	Einordnung des Kapitels 3 in den Rahmen der DSR.....	29
Abbildung 3-2:	Methodik der strukturierten Literaturrecherche:	30
Abbildung 3-3:	Metadatenanalyse der Literaturrecherche: Entwicklung der Forschungsrelevanz der Gebiete anhand der Anzahl an Treffern nach Schlagworten	32
Abbildung 3-4:	Metadatenanalyse der Literaturrecherche: Darstellung der am stärksten beforschten Kombinationen der Schlagworte	33
Abbildung 3-5:	Konkretes Vorgehen in Kapitel 3.2 bezüglich der inhaltlichen Analyse der ausgewählten Ansätze	34
Abbildung 3-6:	Clusteranalyse der bestehenden Ansätze.....	42
Abbildung 3-7:	Strukturierung der Informationsmodellierung nach HAERDER	51
Abbildung 3-8:	Konstruktion eines RDF-Tripels.....	52
Abbildung 3-9:	Konstruktion eines RDF-Graphen	52
Abbildung 3-10:	Beispiel aus Abbildung 3-8 in Turtle-Syntax.....	53
Abbildung 3-11:	Vereinfachte Schreibweise der Turtle-Syntax mittels Präfixen.....	53
Abbildung 3-12:	Beispiel einer Erweiterungsmöglichkeit von RDF durch RDFS.....	54
Abbildung 3-13:	OWL-Profile.....	55
Abbildung 3-14:	Zusammenhang von IDM, MVD und IFC.....	58
Abbildung 3-15:	Beispiel einer Informationsaustauschanforderung	60
Abbildung 4-1:	Einordnung des Kapitels 4 in den Rahmen der DSR.....	70
Abbildung 4-2:	Überführung der Lösungsthese in geeignete Lösungsartefakte	77

Abbildung 4-3:	Screenshot aus <i>Protégé</i> zur exemplarischen Darstellung der <i>Knowledge View</i>	79
Abbildung 4-4:	Exemplarische Darstellung der Anwendung der <i>Process View</i>	80
Abbildung 4-5:	Exemplarische Darstellung der Anwendung der <i>Constraint View</i>	81
Abbildung 4-6:	Exemplarische Darstellung des Validierungsberichts (Screenshot aus <i>Protégé</i>).....	82
Abbildung 4-7:	Visualisierung von <i>Precision</i> und <i>Recall</i>	85
Abbildung 4-8:	Verläufe der F1-Score Kurven; a) konstante mittlere Precision, steigender Recall, b) konstante niedrige Precision, steigender Recall, c) konstante hohe Precision, steigender Recall; Schwellenwert liegt bei 0,5.....	86
Abbildung 4-9:	Aufteilung der Lösungsartefakte auf Folgekapitel.....	87
Abbildung 5-1:	Prozess der Ontologie-Erstellung.....	90
Abbildung 5-2:	Genutztes Präfix der <i>Dublin Core</i> Ontologie in <i>Turtle</i> -Syntax.....	103
Abbildung 5-3:	Genutztes Präfix für SKOS in <i>Turtle</i> -Syntax.....	103
Abbildung 5-4:	Darstellung der Äquivalente zur sprachlichen Ontologie-Integration (Screenshot aus <i>Protégé</i>).....	105
Abbildung 5-5:	Darstellung der Präfixe der genutzten Ontologie und des Erstellers.....	106
Abbildung 5-6:	<i>Annotation Properties</i> der gesamten OFP (Screenshot aus <i>Protégé</i>).....	107
Abbildung 5-7:	Beispielhafter Auszug der OFP zur Darstellung der <i>Annotation Properties</i> (Screenshot aus <i>Protégé</i>).....	108
Abbildung 5-8:	Visualisierung mit OntoGraf (Screenshot aus <i>Protégé</i>).....	109
Abbildung 5-9:	Visualisierung mit WebVOWL.....	110
Abbildung 5-10:	Gesamtdarstellung der OFP inkl. OWL-Thing.....	113
Abbildung 5-11:	Hauptklassen der OFP (Screenshot aus <i>Protégé</i>).....	114
Abbildung 5-12:	Attribute der OFP (Screenshot aus <i>Protégé</i>).....	115
Abbildung 5-13:	Darstellung beispielhafter Hauptklassen der OFP (Screenshot aus <i>Protégé</i>).....	116
Abbildung 5-14:	VOWL-Visualisierung der <i>ofp:Maschine</i>	117
Abbildung 5-15:	VOWL-Visualisierung der Klasse <i>ofp:Reinraum</i>	120
Abbildung 5-16:	Darstellung der Errechnung der Feuchtelast mittels SWRL.....	122
Abbildung 5-17:	Darstellung der Zuordnung einer maximalen Partikelkonzentration mittels SWRL.....	123
Abbildung 5-18:	Beispielhafte Implementierung der Konstante <i>Fallbeschleunigung</i>	124
Abbildung 5-19:	Kollaborationsmodell nach MECKELNBORG.....	125
Abbildung 5-20:	Ordnungsrahmen für die Detaillierung des FP-IDM (LPH 1 und 2).....	127
Abbildung 5-21:	Ordnungsrahmen für die Detaillierung des FP-IDM (LPH 3).....	128
Abbildung 5-22:	Auszug des FP-IDM am Beispiel der Aktivität Detail-/Feinlayout erstellen.....	130

Abbildung 5-23:	Auszug des FP-IDM am Beispiel des PSP-Moduls	132
Abbildung 5-24:	Auszug aus der Prüfungs-Swimlane des FP-IDM	132
Abbildung 5-25:	Kategorisierung der Regeln zur automatischen Validierung	140
Abbildung 5-26:	Beispiel einer Validierung der Maschinenhöhe mit SHACL	144
Abbildung 5-27:	Darstellung des <i>Shapes</i> -Graph aus Abbildung 5-26 in SHACL-SPAQL ..	145
Abbildung 5-28:	Präfixe des Regelskripts.....	147
Abbildung 5-29:	Überprüfung eines Inverse Property am Beispiel der Existenz von Maschinen (z. B. mittels <i>er_128</i>)	148
Abbildung 5-30:	Prüfung auf Existenz einer Eigenschaft am Beispiel der Nennspannung der Maschinen im BI-Model (z. B. mittels <i>er_153</i>)	148
Abbildung 5-31:	Prüfung von <i>Object Properties</i> am Beispiel der räumlichen Maschinenzuordnung.....	149
Abbildung 5-32:	Überprüfung eines <i>Repeated Property</i> am Beispiel der Existenz einer Maschine im Reinraum	149
Abbildung 5-33:	Überprüfung des Datentyps am Beispiel der Maschinenlänge	150
Abbildung 5-34:	Vorgabe der zulässigen Eigenschaftsausprägung am Beispiel von <i>hat_Name</i>	150
Abbildung 5-35:	Statische Überprüfung eines numerischen Wertebereichs am Beispiel von <i>hat_Nennspannung</i>	151
Abbildung 5-36:	Dynamische Überprüfung eines numerischen Wertebereichs am Beispiel der Maschinen- und Raumbreite	152
Abbildung 5-37:	Überprüfung einer Disjunktion am Beispiel der Maschinenleistung	153
Abbildung 5-38:	Überprüfung einer Disjunktion für mehrere Shapes am Beispiel des LOD	154
Abbildung 5-39:	Überprüfung der Verortung in einer definierten Liste am Beispiel des LOI	155
Abbildung 5-40:	Überprüfung einer Negationsbedingung am Beispiel der Maschinenverortung	155
Abbildung 5-41:	Darstellung der Modularisierung von Regeln am Beispiel von Abmaßen (1/2).....	156
Abbildung 5-42:	Darstellung der Modularisierung von Regeln am Beispiel von Abmaßen (2/2).....	157
Abbildung 5-43:	Überprüfung einer Wenn-Dann-Bedingung am Beispiel der LOI	158
Abbildung 5-44:	Multiplikation mittels SHACL-SPARQL am Beispiel der Maschinenleistung	159
Abbildung 5-45:	Überprüfung einer komplizierten rechnerischen Regel	162
Abbildung 5-46:	Architektur von <i>SHACL4P</i>	163
Abbildung 5-47:	Darstellung der Nutzeroberfläche von Protégé und SHACL4P (Screenshot aus <i>Protégé</i>)	164

Abbildung 5-48:	Beispielhafte Darstellung des Validierungsberichts (Screenshot aus <i>Protégé</i>)	165
Abbildung 6-1:	Einordnung des Kapitels 6 in den Rahmen der DSR.....	168
Abbildung 6-2:	BI-Modell des Experiments zur Validierung der Lösungsthese.....	171
Abbildung 6-3:	Auszug der OFP mit Fokus auf <i>ofp:Maschine</i> (Screenshot aus <i>Protégé</i>).....	174
Abbildung 6-4:	Auszug der <i>Process View</i> (1/2).....	175
Abbildung 6-5:	Auszug der <i>Process View</i> (2/2).....	176
Abbildung 6-6:	Auszug aus der exportierten Bauteilliste.....	183
Abbildung 6-7:	Auszug des Transformationsskripts aus <i>Cellfie</i> in <i>Protégé</i>	183
Abbildung 6-8:	Auszug des mit Instanzen befüllten Auszugs der OFP für das Experiment	184
Abbildung 6-9:	Auszug des SHACL-Skripts zur Prüfung Stromstärke.....	185
Abbildung 9-1:	Methodischer Ablauf der Expertenstudie.....	218
Abbildung 9-2:	Ablauf der PRISMA-Methodik.....	228
Abbildung 9-3:	Darstellung des ORSD-Erstellungsprozesses.....	231
Abbildung 9-4:	Integration mittels Matching, Mapping und Merging.....	240
Abbildung 9-5:	Integrierte Ontologien auf Basis von Abbildung 9-4.....	242
Abbildung 9-6:	Darstellung der Abbildung 5-7 in Code-Form.....	246
Abbildung 9-7:	Code-Beispiel mit SPARQL.....	257
Abbildung 9-8:	Code-Beispiel mit <i>ReSh</i>	258
Abbildung 9-9:	Code-Beispiel mit <i>Shape Expressions</i>	258
Abbildung 9-10:	Alternative zu Abbildung 5-43 unter Zuhilfenahme von SPARQL.....	264
Abbildung 9-11:	Überprüfung der Knotenart am Beispiel des LOG.....	265
Abbildung 9-12:	Überprüfung mittels Komposition von Regeln am Beispiel des Reinraums	265
Abbildung 9-13:	Darstellung rekursiver Shapes am Beispiel der RLT-Anlage.....	265
Abbildung 9-14:	Draufsicht.....	270
Abbildung 9-15:	Seitenansichten.....	271
Abbildung 9-16:	Seitenansichten.....	272
Abbildung 9-17:	Cellfie Skript für das Experiment.....	283

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Darstellung des Gebäudelebenszyklus anhand der ISO 22263, der DIN EN ISO 29481-1 sowie den IFM-Phasen	11
Tabelle 4-1:	Methodisches Anforderungsprofil	71
Tabelle 4-2:	Inhaltliches Anforderungsprofil	73
Tabelle 4-3:	Formales Anforderungsprofil	75
Tabelle 4-4:	Confusion Matrix.....	84
Tabelle 5-1:	ORSD der OFP (Teil 1/3)	93
Tabelle 5-2:	ORSD der OFP (Teil 2/3)	94
Tabelle 5-3:	ORSD der OFP (Teil 3/3)	95
Tabelle 5-4:	Auszug aus dem <i>Glossary of Terms</i>	95
Tabelle 5-5:	Auszug des <i>Data Dictionaries</i> für die Fertigungskomponente	96
Tabelle 5-6:	Auszug des <i>Data Dictionaries</i> für den Reinraum.....	97
Tabelle 5-7:	Auszug des <i>Data Dictionaries</i> für die ISO-Reinraumklasse	97
Tabelle 5-8:	<i>Table of Instance Attributes</i> der Instanz <i>hat_Grenzwert_Partikelkonzentration_1</i>	98
Tabelle 5-9:	Auszug der <i>Table of Constants</i> der OFP	98
Tabelle 5-10:	Auszug der <i>Table of Rules</i>	99
Tabelle 5-11:	Auszug der <i>Table of Formulas</i> am Beispiel der Feuchtelast von Personen mit Aktivitätsgrad 1	100
Tabelle 5-12:	Auszug des Integrationsdokuments von MASON	101
Tabelle 5-13:	Auszug des Integrationsdokuments von BRICK.....	102
Tabelle 5-14:	Auszug des Integrationsdokuments von ifcOWL.....	104
Tabelle 5-15:	Visualisierungsmöglichkeiten in OntoGraf und WebVOWL.....	112
Tabelle 5-16:	Einordnung der <i>er_153</i> in Projektphasen.....	133
Tabelle 5-17:	Informationseinheiten-Tabelle der <i>er_153</i>	136
Tabelle 5-18:	K.O.-Kriterien zur Bewertung der Regelsprachen.....	146
Tabelle 5-19:	Darstellung relevanter mathematischer Ausdrücke in der Math-Datenbank	159
Tabelle 6-1:	In das zu prüfende Modell eingebaute Fehler	171
Tabelle 6-2:	Als korrekt zu wertende Planungsinformationen des Modells.....	172

Tabelle 6-3:	Einordnung der <i>er_301</i> in Projektphasen.....	177
Tabelle 6-4:	Informationseinheiten-Tabelle der <i>er_301</i>	178
Tabelle 6-5:	Darstellung der genutzten Regeln der <i>Constraint View</i>	180
Tabelle 6-6:	<i>Confusion Matrix</i> für die Berechnung des F ₁ -Schwellenwerts.....	182
Tabelle 6-7:	Auszug des Validation Reports	186
Tabelle 6-8:	Ergebnisse der manuellen Validierung.....	187
Tabelle 6-9:	Ergebnis der automatischen Durchführung	188
Tabelle 6-10:	Evaluation der methodischen Anforderungen	191
Tabelle 6-11:	Evaluation der inhaltlichen Anforderungen	192
Tabelle 6-12:	Evaluation der formalen Anforderungen	194
Tabelle 9-1:	Zuweisung des Expertenwissens in Form von Thesen zu Haupthindernissen	219
Tabelle 9-2:	Codierung der wichtigsten Hindernisse im BIM-basierten Fabrikplanungsprozess.	219
Tabelle 9-3:	Leistungsbild gemäß den HOAI-Phasen	221
Tabelle 9-4:	Review-Strategie i. A. a. COOPER.....	224
Tabelle 9-5:	Schlagworte der Literaturrecherche.....	225
Tabelle 9-6:	Synonyme des Themenfokus	225
Tabelle 9-7:	Synonyme des Domänenfokus.....	225
Tabelle 9-8:	Synonyme des Methodikfokus.....	226
Tabelle 9-9:	Template des ORSD	232
Tabelle 9-10:	Konzeptionierungsoptionen im Rahmen der Methontology	236
Tabelle 9-11:	Darstellung der Kardinalitätsoptionen	238
Tabelle 9-12:	Template für die <i>Tables of Instance Attribute</i>	239
Tabelle 9-13:	Integrierte Elemente aus der VPI-Ontologie von BUESCHER (1/2)	243
Tabelle 9-14:	Integrierte Elemente aus der VPI-Ontologie von BUESCHER (2/2)	244
Tabelle 9-15:	Überprüfte NFA	247
Tabelle 9-16:	Definitionen der LOG im FP-IDM.....	250
Tabelle 9-17:	Definitionen der LOI im FP-IDM	251
Tabelle 9-18:	Einordnung der <i>er_302</i> in Projektphasen.....	252
Tabelle 9-19:	Informationseinheiten-Tabelle der <i>er_302</i>	254
Tabelle 9-20:	Wunschkriterien zur Bewertung der Regelsprachen	261
Tabelle 9-21:	Datenblatt der Zellassemblierungsanlage.....	272
Tabelle 9-22:	Datenblatt der RLT-Anlage.....	273
Tabelle 9-23:	Datenblatt des Reinraums (oben) und der Steckdose im Reinraum (unten)	274
Tabelle 9-24:	Datenblatt der zu berücksichtigenden Arbeiter im Reinraum	274
Tabelle 9-25:	Liste aller Modellobjekte (1/2).....	276

Tabelle 9-26:	Liste aller Modellobjekte (2/2)	277
Tabelle 9-27:	Exportierte Bauteilliste (1/5)	278
Tabelle 9-28:	Exportierte Bauteilliste (2/5)	279
Tabelle 9-29:	Exportierte Bauteilliste (3/5)	280
Tabelle 9-30:	Exportierte Bauteilliste (4/5)	281
Tabelle 9-31:	Exportierte Bauteilliste (5/5)	282
Tabelle 9-32:	Gesamtübersicht der Fehler	283
Tabelle 9-33:	Gesamter Validation Report des Experiments	284

Formelverzeichnis

Formel 4-1:	Errechnung der <i>Precision</i>	84
Formel 4-2:	Errechnung des <i>Recalls</i>	84
Formel 4-3:	Errechnung des generellen <i>F_β-Score</i>	84
Formel 4-4:	Errechnung des F ₁ -Score	85
Formel 5-1:	Überführung der Abbildung 5-16 in eine konkrete Formel	122
Formel 5-2:	Totale Massenbilanz um den Reinraum	160
Formel 5-3:	Wassermassenbilanz um den Reinraum	160
Formel 5-4:	Herleitung des Wasserdampfdrucks	160
Formel 5-5:	Errechnung der Taupunkttemperatur mithilfe der Magnus-Formel ¹	161
Formel 9-1:	Berechnung der Partikellast im Reinraum	274
Formel 9-2:	Berechnung der Beladung von Raumluft	275
Formel 9-3:	Berechnung der relativen Luftfeuchtigkeit eines Raumes	275
Formel 9-4:	Vereinfachte Berechnung der Wärmelast in einem Raum	276

Formelzeichenverzeichnis

Lateinische Symbole

J	-	Maßeinheit der Energie
kg	-	Maßeinheit der Masse
K	-	Maßeinheit der Temperatur
M	$\frac{kg}{mol}$	Molare Masse
R	$\frac{J}{mol * K}$	Allgemeine Gaskonstante
p	Pa	Maßeinheit des Drucks
W	-	Maßeinheit der Leistung
X	-	Beladung
\dot{Q}	W	Wärmestrom
V	m^3	Volumen
L	$\frac{1}{s}$	Luftwechselzahl
y	-	Abscheidegrad
\dot{m}	$\frac{kg}{s}$	Massenstrom

Griechische Symbole

ϑ	$^{\circ}C$	Celsius-Temperatur
φ	%	Relative Luftfeuchtigkeit
β	-	Gewichtungsfaktor zwischen Precision und Recall

Hoch-/Tiefstehende Indizes

R	-	Raum
W	-	Wasser
L	-	Luft
s	-	gesättigt

Abkürzungsverzeichnis

AIA	Auftraggeberinformationsanforderung(en)
BAP	BIM-Abwicklungsplan
BCF	Open BIM Collaboration Format
BI-Model	Building Information Model
BIM	Building Information Modeling
BIM-AwF	BIM-Anwendungsfall
BPMN	Business Process Modeling Notation
bsDD	buildingSMART Data Dictionary
bsDD-LD	buildingSMART Data Dictionary-Linked Data
CAFM	Computer-Aided Facility Management
CAGR	Compound Annual Growth Rate
CIRP	College International pour la Recherche en Productique
CQ	Competency Question(s)
CQIE	Construction Quality Inspection and Evaluation
CRISP	Cross-Industry Standard Process for data mining
CWA	Closed-World Assumption
DAML-ONT	DARPA Agent Markup Language
DC	Dublin Core
DFMA	Design for Manufacture and Assembly
DL	Description Logic
DSGVO	Datenschutzgrundverordnung
DSR	Design Science Research
ER	Exchange Requirements
EU	Europäische Union
FN	False Negatives
FOL	First-Order Logic
FP	False Positives
FP-IDM	Factory Planning Information Delivery Manual

GMP	Good Manufacturing Practice
GOT	Glossary of Terms
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
HVAC	Heating, Ventilation, Air Conditioning
IAA	Informationsaustauschanforderung
ICV	Integrity Constraint Validation
IDM	Information Delivery Manual
IFC	Industry Foundation Classes
IPD	Integrated Project Delivery
IRI	Internationalized Resource Identifier
IT	Informationstechnologie
JIF	Java Inspection Framework
KAP	Kapazitätsplanung
KG	Kostengruppe
LOD	Level of Development
LOG	Level of Geometry
LOI	Level of Information
LPH	Leistungsphase
MASON	Manufacturing's Semantic Ontology
MVD	Model View Definition
N3Logic	Notation3Logic
NFA	Nicht-funktionale Anforderung(en)
NLP	Natural Language Processing
OFP	Ontology for Factory Planning
ORSD	Ontology Requirements Specification Document
OWA	Open-World Assumption
OWL	Web Ontology Language
PGOT	Pre-Glossary of Terms
PMP	Produktionsmittelplanung
POC	Point of Connection
PRE	Precision
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses
RASE	Requirement, Applicability, Select, Exception
RDF	Resource Description Framework
REC	Recall

Resp.	Respektive
RIF	Rule Interchange Format.
RLT-Anlagen	Raumlufttechnische Anlagen
SHACL	Shapes Constraint Language
ShEx	Shape Expressions
SKOS	Simple Knowledge Organization System
SPIN	SPARQL Inferencing Notation
STARLITE	Sampling strategy, Type of study, Approaches, Range of years, Limits, Inclusion and exclusions, Terms used, Electronic sources
SWRL	Semantic Web Rule Language
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
TN	True Negatives
TP	True Positives
Turtle	Terse RDF Triple Language
u.a.	unter anderem
UML	Unified Modeling Language
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
Vgl.	Vergleiche
VPI	Virtual Production Intelligence
W3C	World Wide Web Consortium
WSML	Web Service Modeling Language
WWW	World Wide Web
WZL	Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen University
XML	Extensible Markup Language
z.B.	zum Beispiel

