

Integriertes Werkstückinformationsmodell zur Ausprägung werkstückindividueller Fertigungszustände

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Dipl.-Ing. André Charles Roger Picard

aus Bad Nauheim

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele
Tag der Einreichung: 03. August 2015
Tag der mündlichen Prüfung: 06. Oktober 2015

Darmstadt 2015

D17

Forschungsberichte aus dem Fachgebiet
Datenverarbeitung in der Konstruktion

Band 53

André Charles Roger Picard

**Integriertes Werkstückinformationsmodell zur
Ausprägung werkstückindividueller Fertigungszustände**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

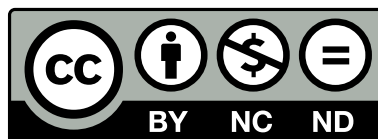
Shaker Verlag
Aachen 2015

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2015

Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung - Nicht kommerziell - Keine Bearbeitungen 4.0 International Lizenz.



<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License.

URN urn:nbn:de:tuda-tuprints-51549

ISBN 978-3-8440-4042-5

ISSN 1435-1129

Wenn eine Idee nicht zuerst absurd erscheint, taugt sie nichts.

Albert Einstein

Kurzfassung

Durch die Digitalisierung und die Vernetzung der Fertigung werden Werkstücke zu Informationsträgern. In der Vision der werkstückgetriebenen Fertigung steuern sie eigenständig ihre individuelle Herstellung. Das durchgängige Engineering dieser Werkstücke erfordert die Entwicklung leistungsfähiger Methoden und Werkzeuge. Insbesondere die durchgängige Informationsverarbeitung in den CAx-Prozessketten von der Produktentwicklung bis in die Fertigung wird derzeit nicht ausreichend sichergestellt. Ein durchgängig nutzbares, digitales Informationsmodell zur Ausprägung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen in der Fertigung existiert bislang nicht.

Das entwickelte Konzept stellt eine Vorgehensweise vor, um diese Lücke in der CAx-Prozesskette zu schließen. Es spezifiziert dazu die digitale Repräsentation des integrierten Werkstückinformationsmodells, welches die geplanten mit den realisierten Fertigungszuständen über webbasierte Ansätze verknüpft. Merkmale und Verhalten werden dazu in der digitalen Repräsentation des 3D-Produktmodells durch semantische Annotationen gekennzeichnet und im Ablaufarbeitsplan zu definierten Fertigungszuständen abgeleitet. Die daraus entstehende Werkstückschablone bildet die informationstechnischen Vorgaben für die Ausprägung werkstückindividueller Fertigungszustände. Während der Fertigung werden dann die Informationen zum realisierten, individuellen Fertigungszustand eines einzelnen Werkstücks in der Werkstückschablone erfasst und webbasiert mit den Produktdaten abgeglichen. Die Auswertung der Werkstückschablone stellt dem Werker in der Fertigung eine Entscheidungsgrundlage bereit, um die Herstellungsprozesse werkstückindividuell im Sinne der werkstückgetriebenen Fertigung zu steuern.

Die Tragfähigkeit des Konzepts wurde anhand eines repräsentativen Anwendungsbeispiels erfolgreich nachgewiesen. Das dazu prototypisch implementierte Assistenzsystem APIZ vernetzt über REST-konforme Webdienste Werkstücke als Informationsträger mit dem 3D-CAD-Autorensystem NX.

Abstract

With the digitalization of manufacturing components become information carriers. In future component-driven manufacturing these components become able to control their individual manufacturing processes as cyber-physical systems. Engineering of these components requires innovative methods and tools for virtual product development. In particular the integrated, uninterrupted flow of information from product development to manufacturing is currently not assured. An integrated, digital information model for the instantiation of individual component states is required, but does currently not exist.

Within this dissertation IT methods and tools are developed to close the presented gap in the CAx process chains. The demonstrated concept describes an approach for the integrated, computer aided modelling of individual component models. This approach is based on the semantic representation of the integrated component information model. It integrates planned product states with individual component states being realized or to be realized during manufacturing. In the presented approach attributes and behaviour are identified within the semantic representation of the 3D product model and transferred to planned product states within route sheets. A component template is created which serves as an initial information base for the instantiation of the individual component states. During manufacturing, information to describe the specific component states is aggregated and stored in the component template. This information is referenced to the existing product states using web-based approaches. Information-carrying components analyse the component template to derive information for the control of their individual manufacturing processes.

The concept has been evaluated using a representative use case. For that purpose the concept has been transferred to a prototypical implementation, called APIZ. APIZ links components as information carriers with the 3D-CAD system NX using REST-based web services.

Geleitwort des Herausgebers

Die moderne Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) bietet vielfältige Innovations- und Leistungspotenziale, die im Entstehungsprozess neuer Produkte auszuschöpfen sind. Dies setzt jedoch voraus, dass die wissenschaftlichen Grundlagen zum Einsatz der modernen IKT in der Produktentstehung vorliegen und neue Methoden wissenschaftlich abgesichert sind. Darüber hinaus stellen die wissenschaftliche Durchdringung und die Bereitstellung wissenschaftlicher Forschungsergebnisse eine abgestimmte Kooperation zwischen Forschung und Industrie dar.

Vor diesem Hintergrund informiert diese Schriftreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Fachgebiets Datenverarbeitung in der Konstruktion (DiK) des Fachbereichs Maschinenbau an der Technischen Universität Darmstadt.

Ziel der Forschungsarbeiten ist die wissenschaftliche Durchdringung innovativer, interdisziplinärer und integrierter Produktentstehungsprozesse und darauf aufbauend die Konzeption neuer Methoden für die Entwicklung, Konstruktion, Arbeitsvorbereitung und Herstellung neuer, innovativer Produkte.

In der virtuellen Produktentstehung stellt die durchgängig digitale Verarbeitung von Produktdaten eine entscheidende Säule für die wirtschaftliche Herstellung von Produkten dar. Ziel der virtuellen Produktentstehung ist die Abbildung und Weiterverarbeitung aller relevanten Produktmerkmale in einem integrierten Produktdatenmodell über den gesamten Produktlebenszyklus. Durch die steigende Digitalisierung und Vernetzung aller Fertigungsressourcen ergeben sich für die virtuelle Produktentstehung neue Handlungsfelder zur Entwicklung innovativer Methoden und Modelle, insbesondere für die Übertragung des integrierten Produktdatenmodells auf die Herstellungsphase einzelner Werkstücke.

Herr André Charles Roger Picard entwickelt in diesem Kontext in seiner Dissertation ein integriertes Informationsmodell zur Ausprägung werkstückindividueller

Fertigungszustände. Die vorliegende Dissertation stellt dabei ein Werkstückinformationsmodell vor, das die verteilten Produktdaten, Fertigungsunterlagen und Werkstückdaten aus der Produktentwicklung, aus der Fertigungsplanung und aus der Fertigung durch webbasierte Ansätze zu einem kohärenten, werkstückindividuellen Informationsmodell integriert. Herr André Charles Roger Picard führt ebenso eine Vorgehensweise ein, um die durchgängige, rechnerunterstützte CAx-Prozesskette vom integrierten Produktdatenmodell ins einzelne Werkstück zu etablieren. Mit dieser Vorgehensweise werden die geplanten Fertigungszustände mit den realisierten Fertigungszuständen auf Grundlage des integrierten Werkstückinformationsmodells semantisch repräsentiert und werkstückindividuell verknüpft. Durch die Anwendung dieses integrierten Werkstückinformationsmodells in der virtuellen Produktentstehung werden Werkstücke zu Informationsträgern, die ihre individuellen Fertigungszustände erfassen, verarbeiten und deren Auswertung in der werkstückgetriebenen Fertigung als Entscheidungsgrundlage für die Steuerung der Herstellungsprozesse bereitstellen können.

Darmstadt, im Oktober 2015

Reiner Anderl

Vorwort des Autors

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeiten als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion (DiK) der Technischen Universität Darmstadt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl, Leiter des Fachgebiets DiK. Durch seine wertvollen Anregungen, der fördernden Motivation und der Bereitstellung wissenschaftlicher Freiräume wurde die Erstellung dieser Dissertation möglich. Herrn Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele, Leiter des Fachgebiets Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW), danke ich für die Übernahme meines Korreferates, der fachlichen Diskussion und der kritischen Durchsicht meiner Dissertation.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am Fachgebiet DiK danke ich für die freundschaftliche und inspirierende Arbeitsatmosphäre und die vielen kritischen Fachdiskussionen und Impulse im und abseits des DiK. Besonderer Dank gilt Herrn Thomas Trinkel und Herrn Daniel Strang. Im Rahmen meiner Dissertationserstellung standen sie jederzeit für kritische Diskussionen zur Verfügung. Für die Durchsicht und die Korrektur meiner Dissertation danke ich zusätzlich Herrn Michael Maurer, Herrn Helge Eichhorn, Herrn Yübo Wang und Herrn Oleg Anokhin.

Mein ganz besonderer und herzlicher Dank geht natürlich vor allem an meine Familie. Mama, Papa und Simon, ich danke euch für die Unterstützung und Motivation auf dem Weg zu meiner Disputation. Friederike, ich danke dir für dein liebevolles Verständnis und deine Geduld an den Abenden und den Wochenenden während der Erstellung meiner Dissertation.

Darmstadt, im Oktober 2015

André Charles Roger Picard

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Abbildungsverzeichnis	vi
Tabellenverzeichnis	vii
Prozedurverzeichnis	ix
Abkürzungsverzeichnis	xi
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Problemstellung	2
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Aufbau der Dissertation	7
2 Stand der Technik und Forschung	11
2.1 Werkstücke als Informationsträger	11
2.1.1 Industrie 4.0-Komponente	12
2.1.2 Werkstückgetriebene Fertigung	15
2.1.3 Digitale Repräsentation von Werkstücken	17
2.1.4 Fazit	21
2.2 Virtuelle Produktentstehung	22
2.2.1 Rechnerunterstütztes Konstruieren	26
2.2.2 Rechnerunterstützte Fertigungsplanung	32
2.2.3 Rechnerunterstützte Fertigungssteuerung	36
2.2.4 Fazit	41
2.3 Grundlagen des Datenmanagement	43
2.3.1 Freigabeprozesse	45
2.3.2 Serviceorientierte Architektur	47
2.3.3 Fazit	48
2.4 Fazit und Potenziale	50

3 Anforderungsprofil	53
3.1 Zieldefinition	53
3.2 Betrachtete Anwendungsfälle	55
3.2.1 Systemakteure	55
3.2.2 Systemgrenzen	58
3.2.3 Systemverhalten	58
3.3 Anforderungen	61
3.3.1 Anforderungen an die Methode	61
3.3.2 Anforderungen an das Informationsmodell	65
3.3.3 Anforderungen an das Assistenzsystem	69
3.4 Fazit	71
4 Konzept	77
4.1 Übersicht über das Gesamtkonzept	77
4.2 Kennzeichnung von Werkstückmerkmalen und -eigenschaften	82
4.2.1 Modellierung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen	82
4.2.2 Produkt- und Werkstückinformationsmodell	84
4.2.3 Kennzeichnung von Referenzmerkmalen	87
4.3 Ableitung der Werkstückschablone	92
4.3.1 Modellierung der Referenzdatenstruktur	92
4.3.2 Prozessinformationsmodell	95
4.3.3 Identifikation von Referenzmerkmalen	96
4.4 Ausprägung werkstückindividueller Fertigungszustände	99
4.4.1 Zuweisen von Werkstückmerkmalen	100
4.4.2 Vergleich von Werkstück- und Referenzmerkmalen	102
4.5 Integriertes Werkstückinformationsmodell	105
4.5.1 Auftrags- und Ressourceninformationsmodell	105
4.5.2 Digitales Informationsrechtmanagement	106
4.6 Fazit	107
5 Prototypische Implementierung	113

5.1	Struktur der technischen Umsetzung	113
5.2	Auswahl der Strukturelemente	116
5.2.1	Auswahl der 3D-CAD-Anwendungssoftware	116
5.2.2	Auswahl der CAPP-Anwendungssoftware	117
5.2.3	Auswahl der Architektur für die Datenhaltung	118
5.2.4	Auswahl des Informationsträgers	119
5.2.5	Auswahl des Kommunikationsformats	120
5.3	Technische Umsetzung	121
5.3.1	Integration in die rechnerunterstützte Produktentwicklung	121
5.3.2	Integration in die rechnerunterstützte Fertigungsplanung	125
5.3.3	Integration in die werkstückgetriebene Fertigung	129
5.4	Fazit	138
6	Validierung des Konzepts	139
6.1	Auswahl des repräsentativen Anwendungsbeispiels	139
6.2	Durchführung der Validierung	142
6.2.1	Modellierung der Werkstückschablone	142
6.2.2	Steuerung der Fertigung	143
6.2.3	Rückverfolgung der Werkstückhistorie	146
6.3	Fazit und Diskussion der Ergebnisse	147
7	Ausblick	155
8	Zusammenfassung	159
	Literaturverzeichnis	162
A	Anhang	183

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

1.1	Überblick über die Zielsetzung	4
2.1	Phasen des Produktlebenszyklus	23
2.2	Generative Geometriemodelle	27
2.3	Akkumulative Geometriemodelle	28
2.4	Exemplarischer Ablaufarbeitsplan mit Fertigungsplanungsdaten	34
2.5	Schnittstelle zur Anwendungsprogrammierung	48
3.1	Betrachtete Anwendungsfälle	56
4.1	Überblick über das Gesamtkonzept	78
4.2	Beispielhafte Darstellung der Vorgehensweise	79
4.3	Überblick über das Informationsmodell	81
4.4	Abhängigkeitsverhältnis zwischen Fertigungszuständen	91
4.5	Schematische Darstellung der Werkstückschablone	93
4.6	Schematische Darstellung von instanziierten, integrierten Werkstückinformationsmodellen	101
4.7	Schematische Darstellung der Verknüpfungstabellen	104
4.8	Informationsprozess zur durchgängigen Ausprägung	108
4.9	Integriertes Werkstückinformationsmodell (Links)	109
4.10	Integriertes Werkstückinformationsmodell (Mitte)	110
4.11	Integriertes Werkstückinformationsmodell (Rechts)	111
5.1	Überblick über die Gesamtstruktur	114
5.2	Kennzeichnung der Prüfmaße	122
5.3	Modellierung von Produkteigenschaften	123
5.4	Modellierung des Ablaufarbeitsplans	126
5.5	Zuordnung von Referenzmerkmalen zum Ablaufarbeitsplan . . .	127
5.6	APIZ-Werkstückträger mit separatem RFID-Tag	130
5.7	Rückverfolgung des Werkstückzustands (Oben)	132
5.8	Rückverfolgung des Werkstückzustands (Unten)	133

Abbildungsverzeichnis

5.9	Informationsschnittstelle an der Fertigungsressource	135
5.10	Rückverfolgung werkstückindividueller Fertigungszustände . . .	137
6.1	Pneumatikzylinderboden mit modellierten Referenzmerkmalen .	143
6.2	Rückverfolgung der Werkstückhistorie	148
A.1	Zwischenzustände eines Pneumatikzylinderbodens	183
A.2	Prüfmaße des Pneumatikzylinderbodens	184
A.3	Arbeitsablaufplan des Pneumatikzylinderbodens	185

Tabellenverzeichnis

2.1	Gegenüberstellung topologischer und geometrischer Entitäten	29
3.1	Überblick über das Anforderungsprofil	72
6.1	Referenzmerkmale für den Zylinderboden D40	140
6.2	Zuordnung von Referenzmerkmalen zu Arbeitsvorgängen	141
6.3	Beispielmessdaten für einen Zylinderboden D40	145
6.4	Überblick über die Anforderungserfüllung	153
A.1	Messdaten zur Parallelität der Oberseite	186
A.2	Messdaten zur Breite der Ringfläche	189
A.3	Messdaten zur Tiefe der Nut	192

Tabellenverzeichnis

Prozedurverzeichnis

5.1	Auszug aus der JSON für ein Prüfmaß	125
5.2	Auszug aus der JSON für einen Ablaufarbeitsplan	128

Prozedurverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

3D	dreidimensional
AP	Application Protocol <i>deutsch:</i> Anwendungsprotokoll
API	Application Programming Interface <i>deutsch:</i> Schnittstelle zur Anwendungsprogrammierung
APIZ	System zur Ausprägung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen
APS	Advanced Planning and Scheduling
AV	Arbeitsvorgang
B-Rep	Boundary Representation
BDE	Betriebsdatenerfassung
BPMN	Business Process Model and Notation <i>deutsch:</i> Geschäftsprozessmodell und -notation
CAD	Computer-Aided Design <i>deutsch:</i> rechnerunterstütztes Konstruieren
CAM	Computer-Aided Manufacturing <i>deutsch:</i> rechnerunterstützte Fertigung
CAPP	Computer-Aided Process Planning <i>deutsch:</i> rechnerunterstützte Fertigungsplanung

Abkürzungsverzeichnis

CAQ	Computer-Aided Quality Assurance <i>deutsch:</i> rechnerunterstützte Qualitätssicherung
CAX	Computer-Aided X
CiP	Center für industrielle Produktivität
CORBA	Common Object Request Broker Architecture <i>deutsch:</i> Allgemeine Architektur für Vermittler von Objekt-Anfragen
CPS	Cyber-Physical Systems <i>deutsch:</i> Cyber-physische Systeme
DCOM	Distributed Component Object Model
DiK	Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
EBOM	Engineering Bill of Material
ERP	Enterprise Resource Planning <i>deutsch:</i> Unternehmensressourcenplanung
FDM	Factory Data Management <i>deutsch:</i> Fabrikdatenmanagement
FEM	Finite-Elemente-Modelle
FQDN	Fully Qualified Domain Name <i>deutsch:</i> vollständig qualifizierter Domänenname
FT&A	Functional Tolerancing and Annotation
GD&T	Geometric Dimensioning and Tolerancing

HTML	Hypertext Markup Language <i>deutsch:</i> Hypertext-Auszeichnungssprache
HTTP	Hypertext Transfer Protocol <i>deutsch:</i> Hypertext-Übertragungsprotokoll
i.O.	in Ordnung
ID	Identifikation
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
IP	Internet Protocol <i>deutsch:</i> Internetprotokoll
IPM	In Progress Modell
ISO	International Organization for Standardization <i>deutsch:</i> Internationale Organisation für Normung
JSON	JavaScript Object Notation <i>deutsch:</i> JavaScript Objektschreibweise
KB	Kilobyte
KBE	Knowledge-based Engineering <i>deutsch:</i> Wissensbasierte Konstruktion
LAN	Local Area Network <i>deutsch:</i> lokales Netzwerk
M2M	Machine-to-Machine <i>deutsch:</i> Maschine-zu-Maschine

Abkürzungsverzeichnis

MBOM	Manufacturing Bill of Material
MDE	Maschinendatenerfassung
MES	Manufacturing Execution Systems <i>deutsch:</i> Fertigungsmanagementsysteme
MHz	Megahertz
mm	Millimeter
MQTT	Message Queue Telemetry Transport
NC	Numerical Control <i>deutsch:</i> numerisch gesteuert
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture
PDC	Plant Data Collection <i>deutsch:</i> Prozessdatenverarbeitung
PDM	Product Data Management <i>deutsch:</i> Produktdatenmanagement
PLCS	Product Life Cycle Support
PLZ	Produktlebenszyklus
PMI	Product and Manufacturing Informationen <i>deutsch:</i> Produkt- und Fertigungsinformation
PPS	Produktionsplanungs- und Steuerungssysteme
REFA	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung

REST	Representational State Transfer
RFC	Request for Comments <i>deutsch:</i> Bitte um Kommentare
RFID	Radio-Frequency Identification <i>deutsch:</i> Hochfrequenzidentifikation
RPC	Remote Procedure Call
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SMB	Server Message Block
SPC	Statistical Process Control <i>deutsch:</i> statistische Prozessregelung
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data <i>deutsch:</i> Standard für den Austausch von Produktmodelldaten
TCP	Transmission Control Protocol <i>deutsch:</i> Übertragungssteuerungsprotokoll
TPD	Technische Produktdokumentation
UML	Unified Modeling Language <i>deutsch:</i> vereinheitlichte Modellierungssprache
URI	Uniform Resource Identifier <i>deutsch:</i> einheitlicher Bezeichner für Ressourcen
VBA	Visual Basic for Applications
vgl.	vergleiche

Abkürzungsverzeichnis

WLAN	Wireless Local Area Network <i>deutsch:</i> drahtloses lokales Netzwerk
WSDL	Web Services Description Language <i>deutsch:</i> Beschreibungssprache für Webdienste

1

Einleitung

Die vorliegende Dissertation beschreibt die Ausprägung werkstückindividueller Fertigungszustände in der werkstückgetriebenen Fertigung. Die werkstückgetriebene Fertigung zeichnet sich durch die Digitalisierung und die Vernetzung aller Fertigungsressourcen aus. Werkstücke werden zu Informationsträgern. Sie resultieren aus der Verschmelzung von mechanischen, elektrotechnischen und informationstechnischen Systemen mit internetbasierten Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) [24, 84]. Diese Werkstücke als Informationsträger verarbeiten Informationen zu ihrem geplanten und ihrem physisch realisierten Fertigungszustand, treffen eigenständig Entscheidungen und kommunizieren mit anderen Fertigungsressourcen. Durch diese Kommunikation steuern Werkstücke als Informationsträger ihren individuellen Entstehungsprozess.

Werkstücke als Informationsträger erfassen und verarbeiten Informationen über ihre Herstellung [149]. Diese Informationen sind für jedes Werkstück werkstückindividuell ausgeprägt¹. Sie beschreiben die spezifischen Zustands- und Prozessdaten eines einzelnen Werkstücks [144]. Das einzelne Werkstück nutzt die verfügbaren Informationen, um seinen Herstellungsprozess individuell zu steuern [149]. Die Produktentwicklung und die Fertigungsplanung modellieren und planen dazu definierte Fertigungszustände für die anschließende Fertigung. Damit das Werkstück während seiner Herstellung diese geplanten Fertigungszustände auswerten und mit seinem eigenen physischen Fertigungszustand

¹ Ausprägung bezeichnet die Zuweisung von systematisch erfassten, quantitativen Daten zu den Merkmalen einzelner, instanzierter Objekte zur Beschreibung physischer Sachverhalte (vgl. Kapitel 4.3.1).

1 Einleitung

vergleichen kann, müssen die geplanten Fertigungszustände informationstechnisch und semantisch mit den physisch realisierten Fertigungszuständen des einzelnen Werkstücks werkstückindividuell verknüpft werden. Durch die semantische Verarbeitung der werkstückindividuellen Fertigungszustände kann das Werkstück als Informationsträger werkstückindividuell durch seine Fertigung steuern oder gesteuert werden. Es kommuniziert dazu mit seiner Fertigungsumgebung, mit dem Ziel den Herstellungsprozess an seine aus dem Vergleich der Fertigungszustände ermittelten Anforderungen zu adaptieren.

1.1 Motivation und Problemstellung

Die steigende Durchdringung der Fertigung mit Informations- und Kommunikationstechnologien liefert neue Ansätze für die technische Realisierung von Werkstücken als Informationsträger. Nach dem derzeitigen Stand der Technik besteht für Werkstücke als Informationsträger Handlungsbedarf (vgl. Kapitel 2.1). Insbesondere der Bereich der virtuellen Produktentstehung muss einerseits hinsichtlich *informationstechnischer Methoden und Werkzeuge* sowie andererseits hinsichtlich *integrierter Informationsmodelle* im Sinne der durchgängigen Informationsverarbeitung von der Produktentwicklung, über die Fertigungsplanung bis zur Werkstückfertigung wissenschaftlich weiter durchdrungen werden.

Die Informationsverarbeitung in der virtuellen Produktentwicklung und rechnerunterstützten Fertigungsplanung von Werkstücken als Informationsträger ist durch den Einsatz rechnerunterstützter Methoden und Werkzeuge geprägt [48]. Kommerziell verfügbare Anwendungssoftware der virtuellen Produktentwicklung und der rechnerunterstützten Fertigungsplanung sind trotz des beachtlichen Leistungsumfangs derzeit nicht in der Lage eine Benutzungsschnittstelle für die Ausprägung werkstückindividueller Fertigungszustände zur Verfügung zu stellen (vgl. Kapitel 2.2). Insbesondere sind derzeit im Hinblick auf die durchgängige Informationsverarbeitung von werkstückindividuellen

Fertigungszuständen weder die Kennzeichnung von geometrischen und nicht-geometrischen Merkmalen im dreidimensionalen (3D) Produktmodell, noch die Modellierung von Werkstückverhalten in der Produktentwicklung, die Ableitung von geplanten, werkstückindividuellen Fertigungszuständen in der Fertigungsplanung oder die Ausprägung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen in der werkstückgetriebenen Fertigung realisiert.

Das Ziel einer semantischen Verknüpfung von werkstückindividuellen Informationen mit dem 3D-Produktmodell wird daher nicht erreicht. Es besteht eine Lücke in den Informationsprozessen zwischen geplanten und realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszuständen. Die Werkstückinformationen sind zwar informationstechnisch werkstückindividuell abbildbar, eine semantische Verarbeitung durch das Werkstück als Informationsträger ist aber nur unvollständig gegeben. Das Werkstück kann keine Verbindung zwischen den erfassten, werkstückindividuellen Informationen und den in der Produktentwicklung und in der Fertigungsplanung geplanten Fertigungszuständen ziehen. Handlungsbedarf besteht daher in der Definition des integrierten Werkstückinformationsmodells für die erforderliche, durchgängig digitale Repräsentation von werkstückindividuellen Fertigungszuständen im Rahmen der virtuellen Produktentstehung von Werkstücken als Informationsträger.

1.2 Zielsetzung

Die vorliegende Dissertation widmet sich der Entwicklung einer informationstechnischen Methode zur Modellierung und Ausprägung werkstückindividueller Fertigungszustände im Rahmen der werkstückgetriebenen Fertigung. Die einleitend formulierte Beschreibung der Ausgangssituation hat den Handlungsbedarf insbesondere im Bereich der durchgängigen Informationsverarbeitung für Werkstücke als Informationsträger in der werkstückgetriebenen Fertigung identifiziert.

1 Einleitung

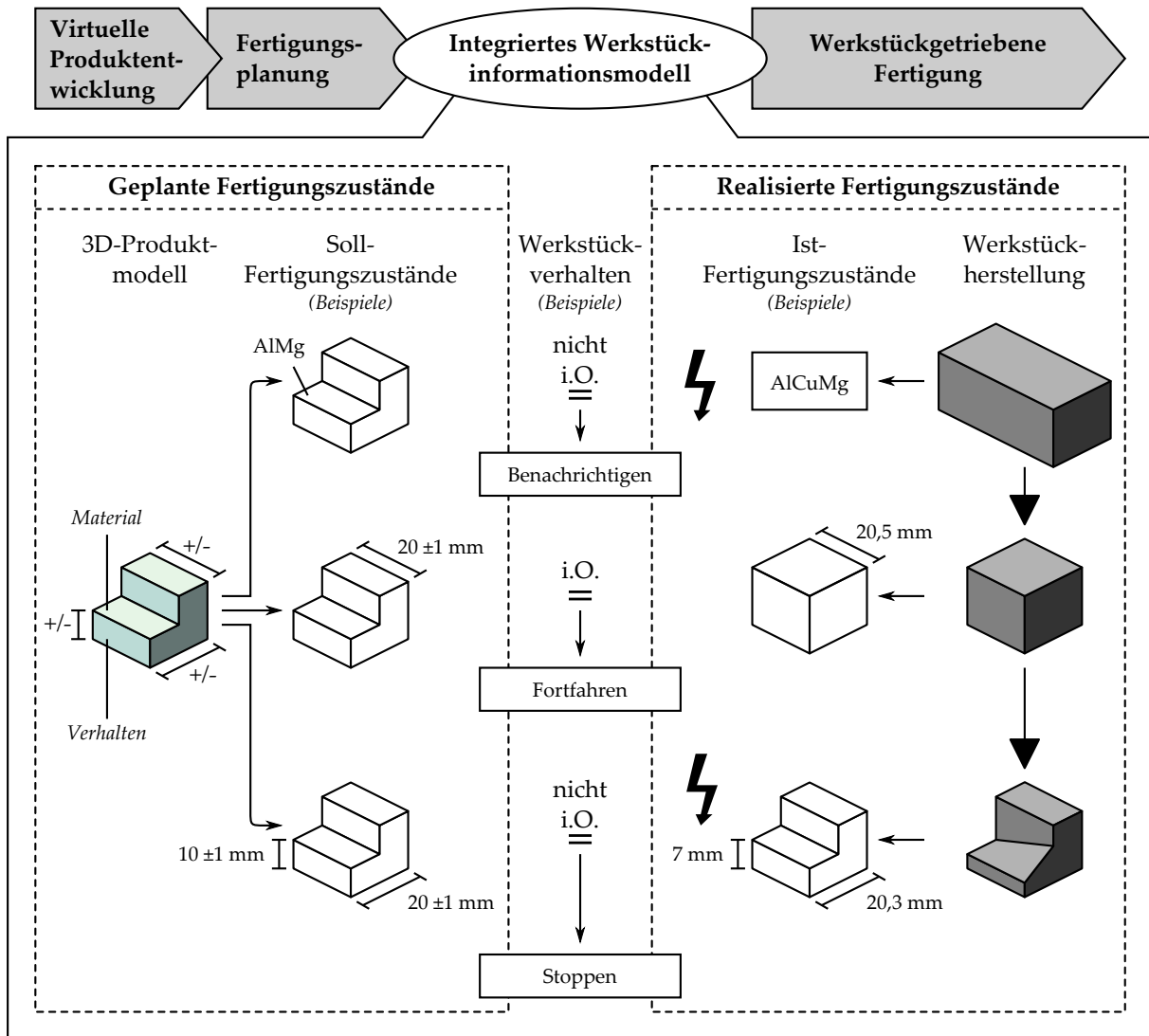


Abbildung 1.1: Überblick über die Zielsetzung (vereinfachte Darstellung) – Schließen der Lücke zwischen geplanten und realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszuständen

Das Ziel dieser Dissertation gliedert sich erstens in die Entwicklung der Methode zur durchgehenden, informationstechnischen Modellierung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen, um die Lücke zwischen Produktentwicklung und der werkstückgetriebenen Fertigung für Werkstücke als Informationsträger schließen. Um außerdem die durchgängig digitale Repräsentation der werkstückindividuellen Fertigungszustände innerhalb der entwickelten Methode sicherzustellen, spezifiziert die vorliegende Dissertation zweitens die erforderliche semantischen Repräsentation in Form des integrierten Werkstückinformationsmodells und beschreibt drittens dessen Ausprägung für Werkstücke als Informationsträger innerhalb der werkstückgetriebenen Fertigung. Abbildung 1.1 stellt die Zielsetzung der Dissertation schematisch vereinfacht dar.

Die geplanten Fertigungszustände eines einzelnen Werkstücks werden im Rahmen vorgelagerter Entwicklungsprozesse in der virtuellen Produktentwicklung und der rechnerunterstützten Fertigungsplanung definiert. Das Werkstück als Informationsträger wertet die physisch realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszustände aus, vergleicht diese mit den geplanten Fertigungszuständen und leitet daraus Entscheidungen für zukünftige Fertigungsprozesse ab. Folgende wissenschaftliche Fragestellungen sind im Zuge der Dissertation zu klären:

- Wie lassen sich geplante Fertigungszustände aus der virtuellen Produktentwicklung und der rechnerunterstützten Fertigungsplanung den Werkstücken als Informationsträgern in der werkstückgetriebenen Fertigung werkstückindividuell bereitstellen?
- Wie lassen sich realisierte, werkstückindividuelle Fertigungszustände mit ihrem Bezug zu den geplanten Fertigungszuständen für die Verarbeitung von Werkstücken als Informationsträger in der werkstückgetriebenen Fertigung repräsentieren?

Für die semantische Repräsentation werkstückindividueller Fertigungszustände ist die Spezifikation der Repräsentation des integrierten Werkstückinformationsmodells notwendig. Ein integriertes Informationsmodell ist aus der Entwicklung

1 Einleitung

des Standard for the Exchange of Product Model Data (STEP) bekannt. Es wird im Rahmen der ISO-Norm 10303 als integriertes Produktdatenmodell bezeichnet. Im Gegensatz dazu zielt das in der vorliegenden Dissertation entwickelte integrierte Werkstückinformationsmodell auf die Abbildung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen und nicht auf mehrere Partialmodelle, die möglichst alle Produktdaten über den gesamten Produktlebenszyklus abdecken. Das Werkstückinformationsmodell integriert dazu die erforderlichen Datenstrukturen, um einzelne Merkmale von werkstückindividuellen Fertigungszuständen in Abhängigkeit des 3D-Produktmodells und des Ablaufarbeitsplan durchgängig bereitzustellen und auszuprägen. In diesem Zusammenhang sind ebenfalls weitere, folgende wissenschaftliche Fragestellungen im Zuge dieser Dissertation zu klären:

- Welche Datenstrukturen muss das integrierte Werkstückinformationsmodell für die Ableitung geplanter Fertigungszustände spezifizieren?
- Welche Datenstrukturen muss das integrierte Werkstückinformationsmodell für die Ausprägung physisch realisierter, werkstückindividueller Fertigungszustände spezifizieren?
- Welche Beziehungs- und Abhängigkeitsstrukturen zwischen den Datenstrukturen muss das integrierte Werkstückinformationsmodell spezifizieren?

Für die Ausprägung der werkstückindividuellen Fertigungszustände verknüpft das integrierte Werkstückinformationsmodell die Fertigungsunterlagen aus dem 3D-Produktmodell und aus dem Ablaufarbeitsplan sowie die werkstückindividuellen Informationen eines einzelnen Werkstücks. Diese sind in verteilten Datenbeständen gespeichert. Die Ausprägung eines werkstückindividuellen Fertigungszustands erfolgt zudem versetzt im Verlauf der individuellen Herstellung des einzelnen Werkstücks. Eine informationstechnische Methode ist daher erforderlich, um die Fertigungszustände jedes Werkstücks werkstückindividuell, zeitlich versetzt auszuprägen und dabei informationstechnisch mit

den geplanten Fertigungszuständen zu verknüpfen. In diesem Zusammenhang sind weiterhin die folgenden wissenschaftlichen Fragestellungen im Zuge dieser Dissertation zu klären:

- Wie lassen sich werkstückindividuelle Fertigungszustände während der Herstellung um werkstückindividuelle Informationen zeitlich versetzt erweitern?
- Wie lassen sich die Fertigungsunterlagen und die werkstückindividuellen Informationen aus den verteilten Datenbeständen für die Ausprägung des werkstückindividuellen Fertigungszustands aggregieren?
- Wie lassen sich geplante Fertigungszustände mit realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszuständen informationstechnisch in Bezug setzen?

Die vorliegende Dissertation soll mit der Beantwortung der vorangegangenen wissenschaftlichen Fragestellungen einen Beitrag zur informationstechnischen Realisierung von Werkstücken als Informationsträger in der werkstückgetriebenen Fertigung leisten.

1.3 Aufbau der Dissertation

Die vorliegende Dissertation gliedert sich zur Bearbeitung der im vorangegangenen Kapitel formulierten wissenschaftlichen Fragestellungen in acht Kapitel.

In Kapitel 1 wird die Thematik der vorliegenden Dissertation beschrieben. Der Handlungsbedarf bei der virtuellen Produktentstehung von Werkstücken als Informationsträger wird hinsichtlich der durchgängigen Informationsverarbeitung von der Produktentwicklung bis zur werkstückgetriebenen Fertigung erörtert. Daraus wird die Zielsetzung dieser Dissertation abgeleitet. Das Kapitel schließt mit der Beschreibung der Struktur der vorliegenden Dissertation ab.

1 Einleitung

In Kapitel 2 erfolgt die Beschreibung und Bewertung des Stands der Technik und der Forschung in den Themenfeldern der virtuellen Produktentstehung von Werkstücken als Informationsträger. Insbesondere werden die Begriffe und die Grundlagen zu Werkstücken als Informationsträger und die informationstechnische Durchdringung der werkstückgetriebenen Fertigung vorgestellt und diskutiert. Das Kapitel beinhaltet die Erörterung ausgewählter Forschungsansätze und themenverwandter Arbeiten.

In Kapitel 3 wird das Anforderungsprofil an das zu entwickelnde Konzept erläutert. Das Anforderungsprofil ergibt sich aus der eingangs beschriebenen Problemstellung und der Diskussion des Stands der Technik und der Forschung.

In Kapitel 4 wird unter Berücksichtigung des Anforderungsprofils das Konzept für die Ausprägung werkstückindividueller Fertigungszustände entwickelt. Die Methode zur durchgängigen Modellierung und zur Ausprägung werkstückindividueller Fertigungszustände durch Instanziierung des integrierten Werkstückinformationsmodells wird vorgestellt. Das Kapitel beinhaltet ebenfalls die Spezifikation des integrierten Werkstückinformationsmodells.

In Kapitel 5 wird zur Überprüfung der Tragfähigkeit des Konzepts die prototypische Implementierung entwickelt. Die Strukturelemente des entwickelten Assistenzsystems zur Ausprägung von Werkstücken als Informationsträger werden vorgestellt und deren Integration in die Prozesskette zur Ausprägung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen erläutert.

In Kapitel 6 wird die Validierung der Tragfähigkeit des Konzepts durchgeführt. Die vorliegende Dissertation beschränkt sich im Rahmen der Validierung auf die informationstechnische Nutzung von Werkstücken als Informationsträger im Rahmen spanender Fertigungsprozesse in der werkstückgetriebenen Fertigung.

In Kapitel 7 wird ein Ausblick auf die Möglichkeit der Erweiterung des vorgestellten Konzepts und sich daraus ergebende potentielle Forschungsthemen

gegeben. Das Potential der bauteilgetriebenen Produktion wird ebenso thematisiert wie der weitere Handlungsbedarf bei der Modellierung von funktionalen Werkstückeigenschaften in der Produktentwicklung.

In Kapitel 8 schließt die Dissertation mit der Zusammenfassung ab.

Im Anhang finden sich Auszüge der Messdaten zu den im Rahmen der Validierung erfassten Messgrößen.

1 Einleitung

Stand der Technik und Forschung

Das vorliegende Kapitel analysiert gegenwärtige Methoden und Werkzeuge zur informationstechnischen Realisierung von Werkstücken, die als Informationsträger in der werkstückgetriebenen Fertigung ihren individuellen Herstellungsprozess steuern. Die Methoden und Werkzeuge werden im Hinblick auf eine durchgängige Informationsbereitstellung und -verarbeitung von der Produktentwicklung über die Fertigungsplanung bis zur spanenden Fertigung untersucht. Das vorliegende Kapitel beschreibt dazu die zugrundeliegenden Begrifflichkeiten und analysiert die derzeitigen Erkenntnisse für die informationstechnische Realisierung von Werkstücken als Informationsträger, die Prozessketten der virtuellen Produktentstehung und des Datenmanagements im Hinblick auf deren durchgängige Informationsverarbeitung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen.

2.1 Werkstücke als Informationsträger

Betrachtungsgegenstand der vorliegenden Dissertation sind Werkstücke als Informationsträger. Im Rahmen der vorliegenden Dissertation sind Werkstücke definiert in Anlehnung an DIN 8580 und DIN 199 TEIL 1:

Definition 1: Werkstück

Ein Werkstück bezeichnet ein Einzelteil während der Fertigung [39], also einen geometrisch bestimmten Körper in der Fertigung, der zerstörungsfrei nicht weiter zerlegt werden kann [38].

Durch den Einsatz moderner Informations- und Kommunikationstechnologien werden Werkstücke zu Informationsträgern. Sie sind eine Sonderform von Industrie 4.0-Komponenten. Die Begriffsdefinition und -abgrenzung zu anderen Begrifflichkeiten sowie die Betrachtung industrieller Einsatzgebiete von Werkstücken als Informationsträger werden nachfolgend vorgestellt.

2.1.1 Industrie 4.0-Komponente

Die kontinuierliche Weiterentwicklung von mechanischen, elektronischen und informationstechnischen Komponenten und deren Integration zu anfangs mechatronischen, dann zu cyber-physischen und derzeit zu Industrie 4.0-Komponenten ermöglicht die Verschmelzung von der physischen und der virtuellen Welt [5, 24, 75].

Mechatronische Systeme bezeichnen dabei Systeme, die sich zur Funktionserfüllung sowohl multipler mechanischer Wirkprinzipien als auch Wirkprinzipien der Regelungstechnik und Signalverarbeitung bedienen [20, 112, 124].

Die Funktionsintegration von Informations- und Kommunikationstechnologien in diese mechatronische Systeme führt zu den *cyber-physischen Systemen (CPS)* [24, 58, 84]. Mit Hilfe eingebetteter Systeme (englisch: embedded system) erfassen CPS Daten aus der physischen Welt [5, 86]. Sie verarbeiten diese Daten und machen sie für die virtuelle Welt zugänglich und nutzbar [5, 58]. In der idealen Vorstellung von CPS entsprechen dabei die Daten der physischen Welt den Daten der virtuellen Welt und umgekehrt [84, 85]. LEE beschreibt dies mit den beiden Ansätzen: *physicalizing the cyber* und *cyberizing the physical* [85]. Sie bezeichnen einerseits die realitätsgetreue Abbildung der physischen Prozesse und Zustände in digitalen Modellen sowie andererseits die Übertragung der virtuellen Prozesse und Zustände in die physischen Komponenten des CPS [85].

Die Integration moderner Informations- und Kommunikationstechnologien, insbesondere von Internettechnologien, in diese CPS führt zu Industrie 4.0-Komponenten. Die *Industrie 4.0-Komponente* wird in Anlehnung an den VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. (VDI) und die VDI/VDE-GESELLSCHAFT MESS- UND AUTOMATISIERUNGSTECHNIK (GMA) sowie an die Definition der PLATTFORM INDUSTRIE 4.0 wie folgt definiert:

Definition 2: Industrie 4.0-Komponente

Eine Industrie 4.0-Komponente bezeichnet einen Gegenstand der physischen oder der virtuellen Welt, der zum einen einen Softwareanteil für die Kommunikation über digitale Kommunikationssysteme besitzt [141] und zum anderen seine Daten als digitale Repräsentation bereitstellt [104, 141].

Industrie 4.0-Komponenten können unterschiedlich umgesetzt werden. Die GMA hat zur Unterscheidung eine Klassifizierung erarbeitet, die jede Industrie 4.0-Komponente zum einen nach dem Grad ihrer Kommunikationsfähigkeit und zum anderen nach ihrem Bekanntheitsgrad in ihrer Umgebung klassifiziert [141]. Diese Klassifizierung bezieht sich dabei gleichermaßen auf physische Gegenstände als auch auf virtuelle Datenobjekte. Nach dieser Klassifizierung sind Industrie 4.0-Komponenten entweder passiv, aktiv oder Industrie 4.0-konform kommunikationsfähig [104, 141].

Für physische Gegenstände bezeichnet die passive Kommunikationsfähigkeit die Möglichkeiten Gegenstände mit einem passiven Informationsträger auszustatten, dessen Daten über Systemschnittstellen ausgelesen werden können, der selbst jedoch nicht aktiv kommuniziert [141]. Ein physischer Gegenstand mit aktiver Kommunikationsfähigkeit hingegen stellt aktiv seine Daten im Kommunikationsnetzwerk bereit [141]. Er nimmt unmittelbar an der Netzkommunikation teil [141]. Eine Industrie 4.0-Komponente mit Industrie 4.0-konformer Kommunikationsfähigkeit stellt die Daten unmittelbar als Dienssystemteilnehmer im Kommunikationsnetzwerk bereit [141]. Bilden dabei Soft- und Hardware eine untrennbare Einheit, wird das System auch als autonome Industrie 4.0-Komponente bezeichnet [141].

2 Stand der Technik und Forschung

Bei *virtuellen Datenobjekten* mit passiver Kommunikationsfähigkeit sind die Daten des Gegenstands zwar auslesbar, eine aktive Kommunikation erfolgt seitens des Datenobjekts jedoch nicht [141]. Bei der aktiven Kommunikationsfähigkeit werden die Datenobjekte aktiv durch eine Softwarekomponente verwaltet und für den Informationsaustausch im Kommunikationsnetzwerk bereitgestellt [141]. Datenobjekte mit Industrie 4.0-konformer Kommunikationsfähigkeit stellen darüber hinaus die Daten im Sinne eines Dienstsysteemteilnehmers bereit [141]. Sie werden durch die GMA auch als Industrie 4.0-Softwarekomponente bezeichnet [141].

Alle Industrie 4.0-Komponenten verfügen nach der Definition der GMA, als Sonderform eines CPS, über eine digitale Repräsentation [141]. Diese digitale Repräsentation bildet die Daten zum Gegenstand digital in werkstückindividuellen Datenobjekten ab [104]. Diese Datenobjekte beinhalten Daten zur Identifizierung, zur Gegenstandsverfolgung, Lebenszyklusdaten und Daten zum Verhalten des Gegenstands [141]. Die digitale Repräsentation wird dem Umgebungssystem der Industrie 4.0-Komponente beispielsweise dem Fertigungssystem als Entität bekannt gemacht [104].

Definition 3: Entität

Eine Entität bezeichnet in der vorliegenden Dissertation ein eindeutig zu bestimmendes, informationstechnisches Objekt, dessen Daten informationstechnisch abgebildet und rechnerverarbeitbar sind.

Die Plattform Industrie 4.0 definiert in diesem Zusammenhang die *Verwaltungsschale*. Die Verwaltungsschale entkoppelt logisch den Gegenstand von seiner digitalen Repräsentation [104]. Sie kann dabei sowohl als integraler Bestandteil in der Industrie 4.0-Komponente (aktive oder Industrie 4.0-konforme Kommunikationsfähigkeit) als auch durch ein oder mehrere, übergeordnete IT-Systeme nach dem Stellvertreterprinzip (passive Kommunikationsfähigkeit) verwaltet und bereitgestellt werden [104]. In beiden Ausführungsformen stellt die Verwaltungsschale die digitale Repräsentation im Sinne eines Dienstsysteemteilnehmers dem Kommunikationsnetzwerk bereit [104].

Die vorliegende Dissertation untersucht die virtuelle Produktentstehung von Werkstücken als Informationsträger. Ein Werkstück als Informationsträger wird in diesem Kontext der Dissertation wie folgt definiert:

Definition 4: Werkstück als Informationsträger

Ein Werkstück als Informationsträger bezeichnet ein Werkstück, das in der Fertigung im Sinne einer Industrie 4.0-Komponente als physischer oder virtueller Gegenstand sowie als Datenobjekt ausgeführt wird.

Die vorliegende Dissertation begreift somit das Werkstück als Informationsträger als eine Industrie 4.0-Komponente innerhalb seiner Fertigungsumgebung. Das Werkstück als Informationsträger setzt sich dabei aus einem physischen oder virtuellen Gegenstand einerseits und einem Datenobjekt andererseits zusammen. Über das Datenobjekt ist die digitale Repräsentation als Entität in der werkstückgetriebenen Fertigung bekannt und kann in deren Informationsprozessen genutzt werden. Die digitale Repräsentation bleibt dabei logisch vom Gegenstand entkoppelt. Die Bereitstellung und die Verarbeitung übernimmt stattdessen die Verwaltungs-Schale.

2.1.2 Werkstückgetriebene Fertigung

Werkstücke als Informationsträger steuern in der werkstückgetriebenen Fertigung selbstständig ihren Herstellungsprozess [96]. Nach dem BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG, GAUSEMEIER sowie dem VDI und der GMA wandeln sich dazu die Produktionssysteme [25, 57, 140]: statt einer zentralen Organisation der Produktion, wird die Produktionssteuerung durch dezentrale, cyber-physische Systeme übernommen [25, 80]. Die klassische Automatisierungspyramide wird sukzessive aufgelöst und in vernetzte, dezentral organisierte Dienste umgewandelt [57, 140]. Die dezentralen Dienste erhalten die Kontrolle über bestimmte Fertigungsprozesse, gleichzeitig erlaubt die Kommunikation die Synchronisation der Dienste [51]. Die Organisation der Produktion wird in diesem Kontext durch das Zusammenspiel aller am Herstellungsprozess

2 Stand der Technik und Forschung

beteiligten Komponenten realisiert [77]. Dieses Produktionssystem wird als cyber-physisches Produktionssystem [77], als Production CPS [143] oder als Smart Factory [17, 87, 147, 154, 155], manchmal auch als adaptives Produktionssystem [51] bezeichnet.

Nach NYHUIS ET AL. treiben in diesen cyber-physischen Produktionssystemen die Werkstücke¹ als Informationsträger ihren individuellen Herstellungsprozess [97]. Sie nutzen die beschriebene Digitalisierung und Vernetzung der Fertigung durch den Einsatz von cyber-physischen Systemen, um ihre individuellen Herstellungsprozesse zu steuern. Dazu erfassen und simulieren sie die Daten ihrer physischen Fertigung. Auf Basis dieser Daten optimieren die Werkstücke ihren individuellen Herstellungsprozess einerseits durch die Auswertung von digitalen Modellen und andererseits durch die Kommunikation mit ihrer Fertigungsumgebung [96]. Werkstücke als Informationsträger handeln dabei in der Kommunikation die aus der Auswertung resultierenden Prozessparameter und Bearbeitungsreihenfolge aus [96]. Die Begrifflichkeit der werkstückgetriebenen Fertigung betont in diesem Zusammenhang über die Steuerung des Herstellungsprozesses insbesondere die wechselseitige Kommunikation zwischen den Werkstücken als Informationsträger einerseits und den cyber-physischen Produktionssystemen andererseits.

Der Begriff der Werkstücke als Informationsträger überschneidet sich thematisch mit den Definitionen von Bauteilen als Informationsträger [96], des Smart Products [4, 12], der gentelligenten Bauteile [30, 31, 96], der industrial cyber-physical systems [27] oder der Definition von digital veredelten Produkten [6, 26].

¹ NYHUIS spricht von Bauteilen als Informationsträger [96]. Ein Bauteil bezeichnet ein Werkstück sowohl innerhalb, als auch außerhalb der Fertigung. Es beschreibt daher ein Einzelteil eines technischen Komplexes, das wie das Werkstück nicht weiter in seine Bestandteile zerlegt werden kann, ohne seine grundlegenden Eigenschaften zu verlieren [45]. Der Betrachtungskontext vom Bauteil liegt jedoch abweichend von der Definition des Werkstücks auf der gesamten Produktion.

2.1.3 Digitale Repräsentation von Werkstücken

Werkstücke als Informationsträger sind vernetzte, dezentral organisierte Dienste in der Fertigung, die sowohl physisch als auch informationstechnisch mit ihrer Umgebung interagieren. Sie bilden Daten und Informationen zu sich selbst und zu ihrer Umgebung in ihrer individuellen, digitalen Repräsentation ab. Wesentliche Bestandteile der digitalen Repräsentation von Werkstücken als Informationsträger sind Simulations-, Planungs- und Beschreibungsmodelle [104]. Ein einheitlicher Standard für die digitale Repräsentation von Werkstücken als Informationsträger existiert zum derzeitigen Zeitpunkt nicht (vgl. [30, 31, 65, 104, 144]). Grundlage ist der Ansatz des Werkstückmodells. Nach MILBERG ist das Werkstückmodell definiert als:

Definition 5: Werkstückmodell

Das Werkstückmodell bezeichnet „das Wissen über mögliche Zustände, die ein Werkstück im Fertigungsprozess vom Rohteil zum Endprodukt einnimmt“ [90]. Zu diesem Wissen zählen insbesondere die geometrischen und nicht-geometrischen Informationen eines einzelnen Werkstücks [127].

Der Ansatz des Werkstückmodells war ursprünglich konzipiert zur realitätsgetreuen Abbildung von Werkstücken für die Schnittstelle zwischen Geometriedefinition und Arbeitsplanung, um Verfahrenswege von numerisch gesteuerten (englisch: Numerical Control, NC) Werkzeugmaschinen abzuleiten [115, 129, 153]. Der Ansatz wird für Werkstücke als Informationsträger erweitert. Im Kontext der werkstückgetriebenen Fertigung muss dann die digitale Repräsentation des Werkstückmodells den aktuellen Werkstückzustand (Ist-Zustand), die realisierten Werkstückzustände (Historie der Ist-Zustände) und die zu realisierenden Werkstückzustände (Soll-Zustände) werkstückindividuell repräsentieren. Sie bildet dazu das einzelne Werkstück modellhaft während seiner Herstellung ab. Im Kontext der vorliegenden Dissertation werden dabei für die werkstück-

2 Stand der Technik und Forschung

getriebene Fertigung insbesondere die quantitativen und qualitativen Merkmale² zur Abbildung der geometrischen Gestalt, der materiellen Stoffeigenschaften und der Oberflächenbeschaffenheit sowie deren Verlauf über den Herstellungsprozess benötigt. Sie sind in der spanenden Fertigung die treibenden Kennwerte für die maßgebliche Gestaltung des Werkstücks und der Fertigungsprozesse (vgl. Kapitel 2.2.2 und Kapitel 2.2.3).

Diese Kennwerte resultieren aus den Produkt- und Fertigungsunterlagen der vorgelagerten Produktentwicklungsprozesse (vgl. Kapitel 2.2). Die aus diesen Unterlagen abzuleitende, digitale Repräsentation des Werkstücks ist jedoch nicht mit der digitale Repräsentation in der werkstückgetriebenen Fertigung identisch. Während in den Produkt- und Fertigungsunterlagen auftragsneutrale und auftragsbezogene Daten von allen Werkstücken zusammengefasst abgebildet sind (vgl. Kapitel 2.2), muss die virtuelle Repräsentation des Werkstücks Daten einzelner Werkstücke abbilden. Eine Transformation der Produkt- und Fertigungsunterlagen in das entsprechende Werkstückmodell ist erforderlich. Dies beinhaltet die Überführung von tolerierten Abmaßen aus dem 3D-Produktmodell in Realmaße des Werkstücks (vgl. Abbildung 1.1 und Kapitel 2.2). Die semantische Verknüpfung des abgeleiteten Werkstückmodells in Bezug zu den Produkt- und Fertigungsunterlagen führt zum Werkstückinformationsmodell.

Definition 6: Werkstückinformationsmodell

Das Werkstückinformationsmodell bezeichnet einerseits die formale Abbildung der quantitativen und qualitativen Werkstückmerkmale der realisierten Werkstückzustände (Ist-Zustand und Historie der Ist-Zustände) sowie andererseits deren Bezug und Beziehungen zu den in der Produktentwicklung geplanten und zu realisierenden Werkstückzuständen (Soll-Zustände).

Der Werkstückzustand ist dabei definiert nach DIN 8580:

² Quantitative Merkmale bezeichnen Merkmale, deren Werte einer Skala mit Abständen zugeordnet sind [35]. Sie unterscheiden sich damit von qualitativen Merkmalen, bei denen die Merkmale einer Skala zugeordnet sind, auf der keine Abstände definiert sind [35].

Definition 7: Werkstückzustand

Ein Werkstückzustand bezeichnet die Gesamtheit aller Informationen, die zur vollständigen Beschreibung der geometrischen Form, der Stoffeigenschaften sowie technologischer Daten eines Werkstücks erforderlich sind [39].

Das Werkstückinformationsmodell erlaubt dem Werkstück, die quantitativen und qualitativen Werkstückmerkmale des Ist-Zustands mit dem geplanten Soll-Zustand zu vergleichen und für die Steuerung des eigenen Herstellungsprozesses zu nutzen. Ausgewählte Forschungsansätze für die Abbildung der Daten aus der werkstückgetriebenen Fertigung in einem Werkstückinformationsmodell werden nachfolgend vorgestellt. Dazu zählen:

- das Anwendungsprotokoll (AP) 239 der ISO-Norm 10303 zum Standard for the Exchange of Product Model Data (STEP),
- das semantische Produktgedächtnis und
- die bauteilinhärente Informationsspeicherung.

Die ISO-Norm 10303 beschreibt im AP 239 die semantische Repräsentation zur Unterstützung des Produktlebenszyklus (englisch: *Product Life Cycle Support*, PLCS) [73] durch Produkt Support Informationen. Für den Austausch und die Integration dieser Produkt Support Informationen [73] definiert das AP 239 Partialmodelle für die Aufzeichnung von Produktstatus und Aktivitäten. Diese setzt das AP 239 mit Definitionen zu Produktdaten und Tätigkeitsbeschreibungen in Beziehung [73]. Das AP 239 kann dadurch die realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszustände abbilden und mit geplanten Fertigungszuständen verknüpfen [73]. Die formale Abbildung zur Beschreibung der geometrischen Werkstückgestalt oder zur Beschreibung von Stoffeigenschaften ist jedoch nicht Bestandteil des AP 239. Daher ist eine durchgängige Informationsbereitstellung im Sinne des Werkstückinformationsmodells durch das AP 239 nicht gewährleistet.

2 Stand der Technik und Forschung

Das *semantische Produktgedächtnis* (englisch: Semantic Product Memory, SEM-PROM) ist nach HAUPERT „ein digitaler Speicher, der alle relevanten Daten [eines Produkts], die im Verlauf der Lebensdauer dieses Objekts ermittelt wurden, dauerhaft kapselt“ [65]. Es dient nach WAHLSTER der Speicherung von Informationen über den Produktlebenszyklus von der Definition, über die Herstellung bis zur Entsorgung [65, 144]. HORN ET AL. beschreibt das Datenformat eines solchen semantischen Produktgedächtnisses, bei dem die erfassten Daten blockweise im Binärformat in Datencontainer persistiert³ werden [70]. Der Ansatz des semantischen Produktgedächtnisses fokussiert dabei auf die Speicherung von Daten über den Herstellungs- und Nutzungsverlauf. Das semantische Produktgedächtnis nach WAHLSTER stellt daher die durchgehende Informationsbereitstellung für Werkstücke als Informationsträger nicht vollständig sicher. Die Daten werden zwar über den Lebenszyklus semantisch persistiert, aber eine digitale Repräsentation von Werkstücken als Informationsträger nur teilweise realisiert, da insbesondere die digitale Repräsentation semantisch nicht mit verfügbaren Produkt- und Fertigungsunterlagen aus der Produktentwicklung oder aus der Fertigungsplanung verknüpft ist.

Die *bauteilinhärente Informationsspeicherung* in gentelligenten Bauteilen nach DENKENA erweitert den Ansatz des semantischen Produktgedächtnis [30, 31]. In gentelligenten Bauteilen werden Informationsträger untrennbar an das Bauteil geheftet [30]. Diese Informationsträger persistieren individuelle Bauteilinformationen über den Lebenszyklus. Mit den Verfahren nach Denkena werden die individuellen Bauteildaten über eine Codetabelle in einen Binärcode überführt und anschließend im Informationsträger persistiert [30, 31]. Anders als das semantische Produktgedächtnis beinhaltet der Ansatz von DENKENA neben Daten aus dem Herstellungsprozess und der Nutzungsphase auch Daten aus der Produktentwicklung und Fertigungsplanung.

³ Die Persistenz bezeichnet die permanente (nichtflüchtige) Speicherung von Daten, Objekten und logischen Verbindungen über die Beendigung oder den Abbruch des erzeugenden Anwendungsprogramms hinaus.

Trotz der Erweiterung des semantischen Produktgedächtnis stellt auch die bauteilinhärente Informationsspeicherung in gentelligenten Bauteilen nach DENKENA die durchgehende Informationsbereitstellung für Werkstücke als Informationsträger nicht vollständig sicher, da der durchgehende Informationsfluss an Informationsentkopplungspunkten zwischen Fertigungsplanung und Fertigung unterbrochen wird [30]. Der bidirektionale Informationsfluss zwischen Werkstück und den vorgelagerten Produktentwicklungsprozessen wird damit unterdrückt. Stattdessen werden die Daten der Produktentwicklung und der Fertigungsplanung am Informationsentkopplungspunkt in ihrem Informationsgehalt bedarfsgerecht reduziert und in ein binäres Datenformat transformiert. Ein Informationsrückfluss ist nach DENKENA über eine separate Informationsrückführung in die Produktentwicklung realisiert, über die neue Repräsentationen zu einem nachgelagerten Zeitpunkt abgeleitet werden können [30]. Ein Werkstückinformationsmodell zur Abbildung werkstückindividueller Fertigungszustände ist durch die bauteilinhärente Informationsspeicherung somit nicht hinreichend gegeben.

2.1.4 Fazit

Werkstücke als Informationsträger steuern ihre individuellen Herstellungsprozesse. Sie bilden dazu erforderliche Daten in den Modellen der digitalen Repräsentation ab und werten diese aus. Voraussetzung ist die informationstechnisch durchgängige Bereitstellung und Verarbeitung der digitalen Repräsentation von der Produktentwicklung bis zur Herstellung des Werkstücks. Diese werkstückindividuelle, digitale Repräsentation bildet die Entscheidungsgrundlage für die Steuerung der Fertigungsprozesse. Sie muss aus den Produkt- und Fertigungsunterlagen abgeleitet und mit diesen Unterlagen bidirektional verknüpft bleiben.

Zusammenfassend sind derzeitige Ansätze der Forschung und der Technik trotz ihres beachtlichen Leistungsumfangs noch nicht in der Lage diese Bereitstel-

lung und Verarbeitung der digitalen Repräsentation sicherzustellen. Durch die durchgeführte Analyse konnte festgestellt werden, dass die Produkt- und Fertigungsunterlagen aus der Produktentwicklung mit der digitalen Repräsentation eines einzelnen Werkstücks semantisch derzeit nicht verknüpft werden. Zwar kann die semantische Verarbeitung der geometrischen Werkstückgestalt, der materiellen Stoffeigenschaften und der Materialoberfläche realisiert werden, die Produkt- und Fertigungsunterlagen werden jedoch an definierten Schnittstellen wie beispielsweise bei der bauteilinhärenten Informationsspeicherung explizit von der digitalen Repräsentation des Werkstücks entkoppelt und damit der durchgehende Informationsfluss unterbrochen.

Die in der Analyse identifizierten Herausforderungen für die vorliegende Dissertation teilen sich daher zum einen in ein durchgehendes Werkstückinformationsmodell über den gesamten Werkstücklebenszyklus und zum anderen in dessen Verarbeitbarkeit unmittelbar durch das Werkstück als Informationsträger. ANDERL ET AL. und PICARD ET AL. führen einen solchen Ansatz mit dem integrierten Bauteilinformationsmodell ein [8, 101]. Dieses Informationsmodell stellt ein generisches Informationsmodell für Bauteile vor. Die Detaillierung des Informationsmodells besonders für werkstückindividuelle Fertigungszustände in der werkstückgetriebenen Fertigung ist derzeit noch nicht erfolgt.

2.2 Virtuelle Produktentstehung

Ein Produkt durchläuft in seinem Produktleben unterschiedliche Phasen. Die vorliegende Dissertation stützt sich dabei auf die Definition des Produkts nach MOSCH:

Definition 8: Produkt

„Das Produkt ist das Ergebnis des von der Produktidee bis zur Produktherstellung durchlaufenen Produktentstehungsprozesses, worin die abstrakt

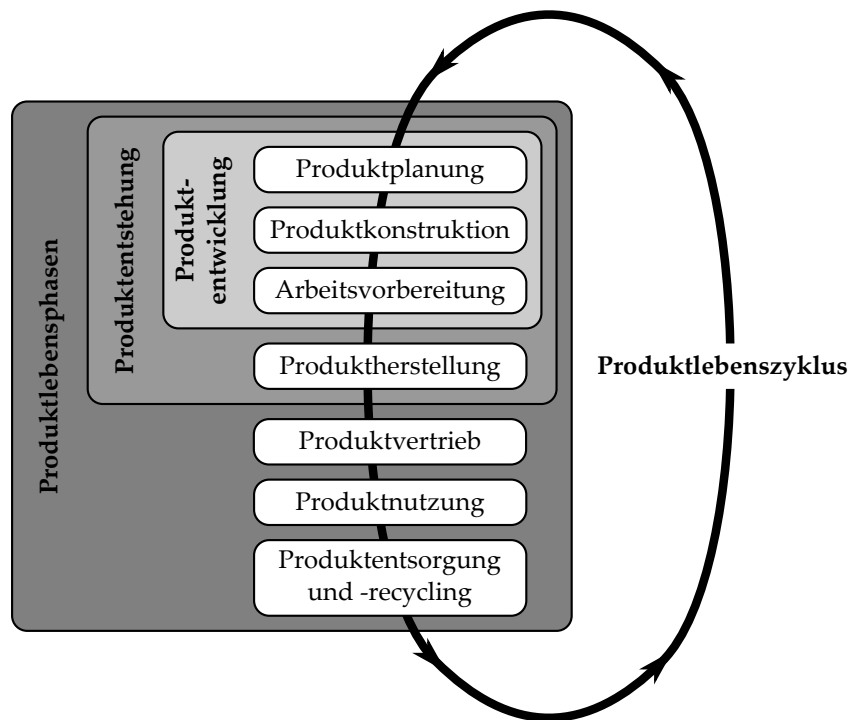


Abbildung 2.1: Phasen des Produktlebenszyklus
in Anlehnung an [15, 122]

modellhaften und abschließend materiell realisierten Produkteigenschaften definiert werden“ [93].

Der Produktlebenszyklus (PLZ) beschreibt nach DIN 15226 den vollständigen „Zeitabschnitt von der ersten Idee bis zur endgültigen Entsorgung des Produktes“ [36]. Der PLZ stellt einen abstrahierten und theoretischen Ansatz für die Betrachtung und Analyse eines Produkts entlang seines Lebenszyklus [15, 113, 122]. Für die virtuelle Produktentstehung von Werkstücken als Informationsträger ist die informationstechnische Sicht auf den PLZ von besonderer Bedeutung. Sie setzt sich nach ANDERL UND TRIPPNER [15] sowie SPUR UND KRAUSE [122] aus sieben, aufeinander folgende Phasen zusammen:

- Produktplanung,
- Produktkonstruktion,

2 Stand der Technik und Forschung

- Arbeitsvorbereitung,
- Produktherstellung,
- Produktvertrieb,
- Produktnutzung und
- Produktentsorgung oder -recycling (vgl. Abbildung 2.1).

Die ersten drei Phasen des PLZ von der Produktplanung bis zur Arbeitsvorbereitung beschreiben die Produktentwicklung [15, 122]. Die ersten vier Phasen des PLZ von der Produktplanung bis zur Produktherstellung bezeichnen die Produktentstehung [15, 122]. In der Produktentwicklung werden die Produkteigenschaften in der Produktdefinition festgelegt und anschließend während der Produktherstellung materialisiert [47].

Zu den Ergebnissen der Produktentwicklung zählen nach EIGNER UND STELZER *„das intellektuelle Produkt mit allen zur Herstellung benötigten Planungsunterlagen und Ressourcen, d. h. die Produktbeschreibung mit allen dazugehörigen Dokumenten, Beschreibungen, Spezifikationen, digitalen Modellen und Entwurfs- und Produktionsunterlagen aller zugehörigen Betriebsmittel“* [49]. Die durchgehende Rechnerunterstützung in der Produktentwicklung führt zur virtuellen Produktentwicklung, bei der die vollständig digitale Beschreibung eines Produkts als virtuelles Produkt bezeichnet wird [122, 56].

Integriertes Produktmodell

Digitale Produktmodelle spezifizieren das virtuelle Produkt über alle Phasen des Produktlebenszyklus [61, 62]. Zu den Funktionen des digitalen Produktmodells zählen der Produktdatenaustausch, die Produktdatenspeicherung, die Produktdatenarchivierung und die Produktdatentransformation [3, 62]. Sie zielen ab auf die interdisziplinäre Definition, realitätsnahe Beschreibung und Darstellung von Produktinformationen sowie deren anwendungsbezogene Bereitstellung und

Verarbeitung [62]. Digitale Produktmodelle setzen sich aus diesem Grund nach GAUSEMEIER aus Makro- und Mikromodellen zusammen [56, 57]. Die Makromodelle beschreiben Metadaten zur Beschreibung der Daten untereinander sowie deren Einordnung und Verwendung innerhalb des Produktentwicklungsprozesses. Zu den Informationsmengen von Makromodellen zählen beispielsweise die Teilenummer, der Name des Erstellers oder die Abbildung der Produktstrukturen [56]. Mikromodelle bilden die produktbeschreibenden Daten ab. Sie beinhalten die domänenspezifischen Informationsmengen wie beispielsweise 3D-Volumenmodelle aus dem rechnerunterstützten Konstruieren oder NC-Steuerprogramme aus der rechnerunterstützten Fertigung [56].

Integrierte Produktmodelle vereinen diese Informationsmengen [3]. Sie zielen auf ein umfassendes, konsistentes Produktmodell über alle Entwicklungsdomänen und über den gesamten Produktlebenszyklus ab [61, 56]. Das integrierte Produktmodell nach ANDERL UND TRIPPNER setzt sich dazu aus der Produktdefinition, der Produktrepräsentation und der Produktpräsentation zusammen [15]. Die Produktdefinition umfasst die administrativen und organisatorischen Produktdaten wie die Daten zur Identifikation, zur Klassifizierung eines Produkts und zur Produktstruktur [15]. Die Produktrepräsentation bildet die Produktdaten rechnerverarbeitbar ab [15]. Die Produktpräsentation bezeichnet die graphische oder textuelle Darstellung der Produktrepräsentation [15]. In der industriellen Anwendung wird das integrierte Produktmodell nach ANDERL UND TRIPPNER durch das Produktdatenmodell der ISO-Norm 10303 eingesetzt, auch bekannt als STEP [15, 71, 74].

Die virtuelle Produktentstehung von Werkstücken als Informationsträger wird im nachfolgenden Kapitel im Hinblick auf die durchgängige Informationsbereitstellung und -verarbeitung analysiert. Gegenstand der Betrachtung sind dabei insbesondere der Informationsumfang der verwendeten Produktmodelle und die informationstechnischen Prozessketten der virtuellen Produktentstehung. Als informationstechnische Prozesskette ist in diesem Zusammenhang die definierte, verlaufsorientierte, parallele oder sequentielle Abfolge von Infor-

mationsprozessen zu verstehen [122]. Die Informationsprozesse beschreiben die Informationsbereitstellung, den Informationsfluss und die Informationsverarbeitung [122]. Die Durchdringung der Rechnerunterstützung in den einzelnen Phasen der virtuellen Produktentstehung und deren Kombination führt zu nachfolgend betrachteten rechnerunterstützten (CAx) Prozessketten.

2.2.1 Rechnerunterstütztes Konstruieren

Das rechnerunterstützte Konstruieren (englisch: Computer-Aided Design, CAD) bezeichnet nach der VDI-RICHTLINIE 2249 „*die generelle und umfassende Unterstützung aller Konstruktionstätigkeiten durch Rechnerhilfsmittel*“ [131]. Die Tätigkeiten beinhalten die topologisch-geometrische Modellierung, die Berechnung und Simulation sowie die Informationsgewinnung mit dem Ziel, ein Produktmodell zu erzeugen [131]. Die Repräsentation von topologischen und geometrischen Produktdaten bildet nach ROLLMANN dabei die Basismethoden zur Beschreibung und Verarbeitung von Produkten während des rechnerunterstützten Konstruierens [113]. Der Konstrukteur legt hierzu die geometrischen und topologischen Produktdaten in 3D-Geometriemodellen fest [66, 113].

Volumenmodellierung

Die VDI-RICHTLINIE 2209 unterscheidet 3D-Geometriemodelle auf Basis der Dimensionalität in Kanten-, Flächen-, Volumen- beziehungsweise Körpermodelle [66, 130]. Vor dem Hintergrund derzeitiger 3D-CAD-Systeme werden nachfolgenden ausschließlich die Volumenmodelle näher analysiert. Volumenmodelle werden im Wesentlichen in generative beziehungsweise prozedurale sowie in akkumulative beziehungsweise deskriptive Geometriemodelle unterschieden [130].

In den *generativen beziehungsweise prozeduralen Geometriemodellen* wird der darzustellende Körper durch eine Erzeugungslogik, den Lösungsweg, abgebil-

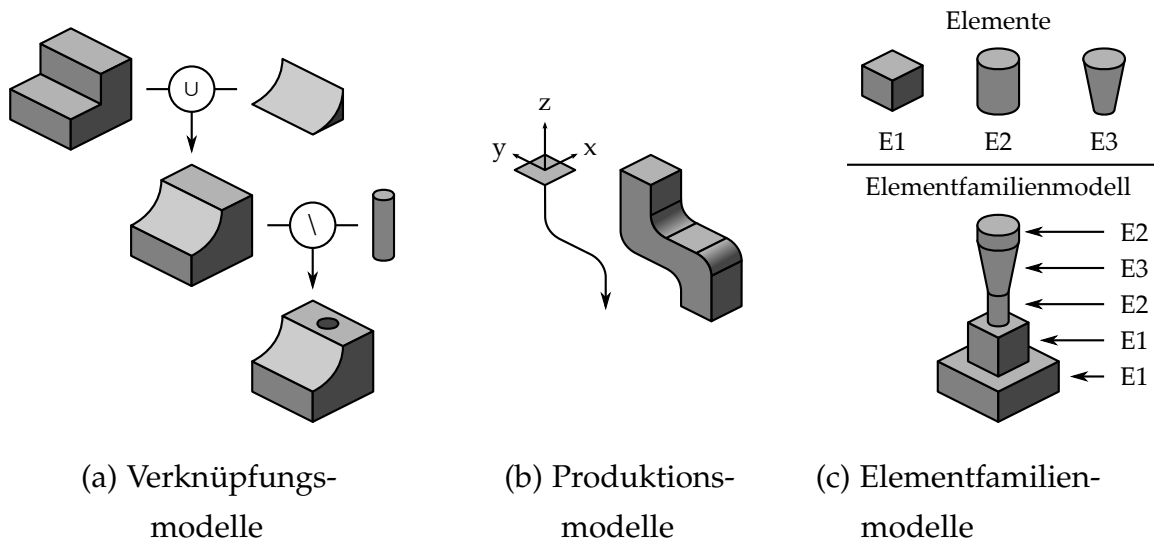


Abbildung 2.2: Generative Geometriemodelle nach [63]

det [66, 130]. Die Erzeugungslogik beschreibt ein Programm mit Erzeugungsvorschriften, welches alle Modellinformationen zur Abbildung beinhaltet [66, 130]. Vertreter der generativen Geometriemodellen umfassen die Verknüpfungsmodelle (englisch: Constructive Solid Geometry, CSG), Produktionsmodelle (englisch: Sweep Representation) und Elementfamilien (englisch: Feature Representation) (vgl. Abbildung 2.2) [66, 130].

Das Volumenmodell wird in CSG-Geometriemodellen durch mengentheoretische Verknüpfungen (Boolesche Verknüpfung) von Volumenprimitiva gebildet [130, 132]. Die Erzeugungslogik beschreibt die einzelnen Verknüpfungen in ihrer logischen und historischen Reihenfolge [130]. Produktionsmodelle bilden das Volumenmodell durch Verschiebeverfahren von Querschnittsflächen entlang von Leitkurven ab [66, 132]. Bei Elementfamilien wird das Volumenmodell aus vordefinierten, parametrisierten⁴, elementaren Volumenmodellen erzeugt [66]. Die Erzeugungslogik beschreibt ebenfalls die logische und historische Reihenfolge der verwendeten parametrisierten, elementaren Volumenmodellen [66].

⁴ Parameter bezeichnen nach DIN 32869-3 programmtechnisch verarbeitbare Größen innerhalb der Funktionselemente der Elementfamilien [44].

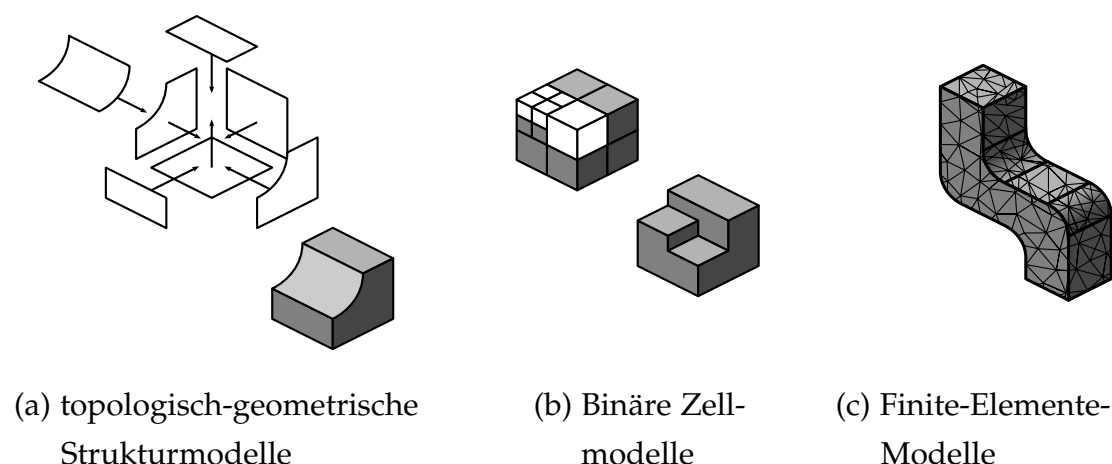


Abbildung 2.3: Akkumulative Geometriemodelle nach [63]

In den *akkumulativen beziehungsweise deskriptiven Geometriemodellen* wird der darzustellende Körper als Lösungsergebnis abgebildet [66, 130]. Sie speichern die Erzeugungslogik zur Erzeugung der Geometrie separat von der Repräsentation der Modellinformationen [66, 130]. Das Ergebnis wird als Datenstruktur abgelegt [66]. Vertreter der akkumulativen Geometriemodelle sind Finite-Elemente-Modelle (FEM), binäre Zellmodelle sowie die topologisch-geometrischen Strukturmodelle, auch Randrepräsentationen genannt (englisch: Boundary Representation, B-Rep) (vgl. Abbildung 2.3) [66, 130].

In FEM wird das Geometriemodell in eine Menge an endlichen Elementen zerlegt, die über Knotenpunkte miteinander verbunden sind [66]. FEM werden zu Berechnungszwecken statt zur Geometriemodellierung genutzt [66]. Binäre Zellmodelle zerlegen den darzustellenden Körper in eine Menge von sich nicht überlappenden, benachbarten Zellen [66]. Topologische-geometrische Strukturmodelle bilden den Geometriekörper durch seine begrenzende Oberflächen und eine Orientierung ab [66, 130]. Sie definieren dazu eine hierarchische Struktur zur Beschreibung der Nachbarschaftsbeziehungen, bestehend aus den nachfolgenden topologischen Primitivelementen in Tabelle 2.1. Die Topologieelemente werden, falls vorhanden, mit den geometrischen Entitäten in Verbindung gesetzt (vgl. Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1: Gegenüberstellung topologischer und geometrischer Entitäten

Topologisches Element		Geometrisches Element
Körper	(Body)	Volumen
Oberflächenverbund	(Shell)	–
Oberfläche	(Face)	Fläche
Berandung	(Loop)	–
Kante	(Edge)	Linie
Eck-/Endpunkt	(Vertex)	Punkt

Hybride Modelle nutzen für die Repräsentation von Geometriemodellen eine Kombination aus den generativen und den akkumulativen Repräsentationsverfahren [66, 130]. In der industriellen Praxis setzen sich die meisten hybriden Modelle aus einem primären CSG-Modell für die Modellierung mittels Verknüpfungsvorschriften und aus einem sekundären topologisch-geometrischen Strukturmodell für die Visualisierung zusammen [66]. Für die Modellierung von Werkstücken als Informationsträger werden aber nachfolgend ausschließlich jene hybriden Modelle berücksichtigt, die die Produktgestalt explizit in deskriptiven Geometriemodellen wie einem topologisch-geometrischen Strukturmodell bereitstellen.

Produktannotationen

Das 3D-Produktmodell enthält für die Produktdokumentation neben der 3D-Produktgeometrie ergänzende, nicht-geometrische Produktdefinitionsdaten, die für die vollständige Definition des Produkts erforderlich sind [61, 42]. Zu diesen Produktdefinitionsdaten zählen Produktattribute und Produktnotierungen, auch Produktannotationen genannt [72]. Produktattribute bezeichnen dabei *„Maße, Toleranzen, Bemerkungen, Text oder Symbole, um die Produktdefinition oder Elemente des Produkts, die nicht in der Geometrie oder in den Modellnotierungen dargestellt, aber durch Abfragen des Modells verfügbar sind, zu vervollständigen“* [42].

2 Stand der Technik und Forschung

Produktannotationen sind „Maße, Toleranzen, Bemerkungen, Text oder Symbole, die ohne manuelle oder äußerliche Manipulation sichtbar sind“ [42].

Die Produktannotationen können mit anderen Bestandteilen des 3D-Produktmodell wie beispielsweise den Produktattributen zur Oberflächenbeschaffenheit verknüpft sein. Da das 3D-Produktmodell ein Produkt in seiner idealen geometrischen Gestalt repräsentiert [42], können in diesem Zusammenhang die Produktannotationen den dimensionalen Zustand der Gestalt ergänzen [42]. Das 3D-Produktmodell muss dazu hinreichende Informationen enthalten, um erstens die Modellwerte aus den Produktattributen bereitzustellen, um zweitens die bidirektionale Beziehung zwischen Modellgeometrie und Produktannotationen abzubilden sowie um drittens eine Verknüpfung von geometrischen Elementen, der topologisch-geometrischen Struktur und den Konstruktionselementen des CSG-Modells sicherzustellen [42].

Eine Sonderform der genannten Produktnotierung bilden nach GILSDORF die semantischen Produktannotationen [59]: Semantische Produktannotationen bezeichnen ausschließlich die digitalen Annotationen, die Produktattribute mit einer Semantik zur rechnerinternen Weiterverarbeitung bereitstellen [59]. Semantische Annotationen erlauben damit die Kennzeichnung und Weitergabe von fertigungsrelevanten, nicht-geometrischen Produktinformationen aus dem rechnerunterstützten Konstruieren an die nachfolgenden Prozesse der Fertigungsplanung und der Fertigung [117]. Die semantischen Produktannotationen werden dazu mit den Produktattributen über die geometrische Struktur des 3D-Produktmodells in Beziehung gesetzt [71, 142]. Bei hybriden Modellen ist eine Assoziation zwischen semantischer Produktannotationen und sowohl der geometrischen, als auch der topologischen Struktur realisierbar [71, 117].

Produktannotationen und insbesondere semantische Produktannotationen werden in der industriellen Praxis je nach Hersteller der 3D-CAD-Anwendungssoftware auch als Product and Manufacturing Information (PMI), als General Tolerances and Annotation, als Geometric Dimensioning and Tolerancing (GD&T), als Geometrical Product Specifications oder als Functional Tolerancing

and Annotation (FT&A) bezeichnet [126]. Die in der industriellen Praxis verwendeten Begrifflichkeiten differenzieren dabei nicht zwischen Produktannotationen ohne Semantik wie beispielweise Textannotationen und Produktannotationen mit Semantik wie beispielweise semantischen Annotationen zur Form- und Lagetoleranz [126].

Prozesskette CAD-technische Produktdokumentation

Mit dem Einsatz semantischer Produktannotationen wird die Digitalisierung der technischen Produktdokumentation (TPD) unterstützt. Nach der VDI-RICHTLINIE 4500 umfasst die TPD *„alle Informationen, die von einem Hersteller/Vertreiber parallel zum Entstehen und zum Lebensweg eines Produktes (Produktlebenszyklus) erstellt werden“* [133]. Die TPD wird dabei in die interne und die externe technische Dokumentation unterteilt [133]. Für die vorliegende Dissertation ist insbesondere die interne technische Dokumentation von Bedeutung. Sie beinhaltet die Dokumentation über den gesamten Produktlebenszyklus, die im Unternehmen verbleibt, zu allen *„notwendigen Angaben zu Entwicklung, Fertigung, anwendungsbezogener Prüfung, Instandhaltung, Produktbeobachtung und Entsorgung“* [133] für die qualitätsgerechte Herstellung eines Produktes [133].

In Prozessen der virtuellen Produktentstehung erfolgt die TPD rechnerunterstützt. Der Fertigungsprozess schließt sich lückenlos an den Produktentwicklungsprozess an [134]. *„Die Technische Dokumentation muss zwingend als Bestandteil in diese Prozesse integriert sein. Nur so kann sichergestellt werden, dass der gesamte erforderliche Dokumentationsumfang mit dem vollständigen Informationsgehalt termingerechtfähig verfügbar ist“* [134]. Die dazu erforderliche Prozesskette CAD-TPD umfasst die Erstellung der verbindlichen Unterlagen für die der Produktentwicklung nachgelagerten Prozesse. Im Kontext der werkstückgetriebenen Fertigung zählen zu diesen Unterlagen insbesondere digitale Fertigungsunterlagen wie technische Zeichnungen für Einzelteile und Ablaufarbeitspläne [137] (vgl. Kapitel 2.2.2).

Technische Zeichnungen stellen in der industriellen Praxis durch die TPD den verbindlichen Datensatz zur Fertigung von Produkten [78, 108]. Die Ausgabemedien für technische Zeichnungen im Rahmen der TPD können sowohl analoge Medien auf Papier als auch digitale Medien umfassen [38, 78]. Für die vorliegende Dissertation werden für die CAx-Prozesskette ausschließlich digitale Ausgabemedien berücksichtigt. Die digitale TPD über technische Zeichnungen nutzt semantische Produktannotationen. Diese kennzeichnen Produktinformationen zur Produktgestalt und Produktattribute, indem sie Produktmodelle um Textannotationen ergänzen. In der industriellen Praxis lehnt sich die Präsentation der semantischen Produktannotationen in den 3D-CAD-Systemen an die Schemata der technischen Zeichnungen an oder sie übernimmt diese sogar vollumfänglich. Die semantischen Annotationen nutzen dazu sowohl textuelle als auch symbolische Darstellungen (vgl. [33, 37, 46]). Beispielweise werden Prüfmaße, also Maße, die bei der Festlegung des Prüfumfangs besonders durch den Besteller oder Empfänger des Produkts geprüft werden [32], sowohl in technischen Zeichnungen als auch bei semantischen Annotationen durch einen Rahmen mit zwei Halbkreisen dargestellt (vgl. Abbildung 5.2) [33].

In der Prozesskette *CAD-TPD* sind textuelle und symbolische Darstellung dieser Schemata mit einer Semantik angereichert, die insbesondere die Weiterverarbeitung in den nachgelagerten Prozessen erlaubt.

2.2.2 Rechnerunterstützte Fertigungsplanung

Die rechnerunterstützten Fertigungsplanung zielt auf die Gestaltung des Ablaufs der Fertigungsprozesse ab [108, 7]. Sie setzt sich zusammen aus der Materialplanung, der Betriebsmittelplanung, der Informationsplanung und der Ablaufplanung [108, 148]. Die *Materialplanung* bezeichnet dabei die Auswahl wirtschaftlicher Materialien zur Werkstückherstellung [108, 148]. Die *Betriebsmittelplanung* bezeichnet die Auswahl geeigneter Arbeitsverfahren, Arbeitsmethoden und Betriebsmittel [108, 148]. Die *Informationsplanung* bezeichnet die

Erstellung vollständiger und verständlicher Fertigungsunterlagen [108, 148]. Die *Ablaufplanung* bezeichnet die Festlegung der Arbeitsvorgänge und ihrer Reihenfolge [108, 148].

Die rechnerunterstützte Fertigungsplanung bezeichnet insbesondere die Bewältigung der genannten Tätigkeiten unter Verwendung informationstechnischer Methoden und Werkzeuge [66]. In diesem Zusammenhang umfassen die Fertigungsunterlagen digitale Dokumente, die die Durchführung der Arbeitsvorgänge und Arbeitsabläufe sowie die erforderlichen Mittel und Daten enthalten [108]. Der Fertigungsplaner setzt zur Erstellung der Fertigungsunterlagen die geometrischen, technologischen und strukturellen Daten aus dem rechnerunterstützten Konstruieren in Organisations- und Steuerungsdaten für die Fertigung, Montage und Qualitätssicherung um [50, 66]. Die rechnerunterstützte Fertigungsplanung bildet somit aus informationstechnischer Sicht das Bindeglied zwischen Produktentwicklung und Produktherstellung [50, 128].

Im Kontext der vorliegenden Dissertation kommt der Erstellung des digitalen Ablaufarbeitsplans als Bestandteil der rechnerunterstützten Fertigungsplanung eine zentrale Rolle zu. „Der Ablaufarbeitsplan enthält alle Arbeitsvorgänge in ihrer logischen Reihenfolge, die zur Fertigung [...] eines Arbeitsgegenstands erforderlich sind“ [108]. Der Arbeitsvorgang ist definiert in Anlehnung an DIN 8580 [39] als:

Definition 9: Arbeitsvorgang

Ein Arbeitsvorgang bezeichnet das schrittweise Verändern der Form- und Stoffeigenschaften eines Werkstückausgangszustands in einen Werkstückendzustand [39]. Der Werkstückzustand vor einem Arbeitsvorgang wird Ausgangszustands benannt, zwischen Ausgangs- und Endzustand als Zwischenzustand betitelt und nach dem Arbeitsvorgang als Endzustand bezeichnet [39].

Ein Werkstück vor der Bearbeitung durch ein Fertigungsverfahren innerhalb des ersten Arbeitsvorgang wird Rohteil genannt, während des Herstellungsprozesses

2 Stand der Technik und Forschung

Auftragsnummer	Auftragsangaben	Auftragsmenge	Losnummer		} Allgemeine Daten	
Sachnummer	Bezeichnung des Arbeitsgegenstands	Zeichnungsnummer	Abnahmevorschrift			} Ausgabedaten (Zielinformationen)
Sachnummer	Bezeichnung des Ausgangsmaterials	Menge und Mengeneinheit	Ausgangsmaß und -gewicht			
Vorgangsnummer	Vorgangsbezeichnung		Vorgabezeiten		} Ablaufdaten	
	Arbeitsplatz, Betriebsmittel	Werkzeug, Vorrichtung, Hilfsmittel	Rüstzeit	Stückzeit		
1						
2						
3						

Abbildung 2.4: Ausschnitt aus exemplarischem Ablaufarbeitsplan mit Fertigungsplanungsdaten in Anlehnung an [108]

Halbfertigteil und nach dem Abschluss aller Bearbeitungsschritte des letzten Arbeitsvorgangs Fertigteil [39].

Der Ablaufarbeitsplan umfasst im Kontext der rechnerunterstützten Fertigungsplanung die auftragsunabhängigen Arbeitsplandaten. Abbildung 2.4 stellt einen Ausschnitt aus einem Ablaufarbeitsplan exemplarisch dar. Diese Daten werden unterteilt in allgemeine Daten, Ausgabedaten, Eingabedaten und Ablaufdaten [108]. Sie umfassen das verwendete Material, sowie für jeden Arbeitsvorgang den Arbeitsplatz, die Betriebsmittel und die Vorgabezeiten [108, 148]. Eine detaillierte Aufzählung der auftragsunabhängigen Arbeitsplandaten gibt der VERBAND FÜR ARBEITSGESTALTUNG, BETRIEBSORGANISATION UND UNTERNEHMENSENTWICKLUNG (REFA) in [108].

Die Durchführung der Fertigungsplanung ist zentrale Aufgabe des Fertigungsplaners. Erfahrung und Wissen üben unmittelbar Einfluss auf die Generierung des Ablaufarbeitsplans [76]. Unterschiedliche Ablaufarbeitspläne in Abhängigkeit des Fertigungsplaners sind die Folge. Diese Ablaufarbeitspläne sind zwar sämtlich in der Fertigung durchführbar, führen aber zu differenzierter Werkstückqualität sowie unterschiedlichen Fertigungszeiten und -kosten [28, 76].

Eine Automatisierung der Erstellung ist jedoch nach CULLER nur mit Aufwand zu realisieren, da die Fertigungsplanung eng mit der bereits genannten Praxiserfahrung des Fertigungsplaners sowie mit Unternehmenswissen und -richtlinien verknüpft ist [28]. Der Einsatz der Informationstechnologie in Anwendungssystemen zur rechnerunterstützten Fertigungsplanung und zur rechnerunterstützten Fertigung bieten Ansätze für die Unterstützung bis zur teilweisen Automatisierung der Fertigungsplanung.

Prozesskette CAD-rechnerunterstützte Fertigungsplanung

Die Ablaufarbeitsplandaten vereinen Informationen über Produkte und Produktionsmittel. Zu produktbeschreibenden Informationen zählen Informationen zur Gestalt, zum Material sowie zu den Toleranzangaben [91]. Die Informationen zu Produktionsmitteln umfassen die Fähigkeiten der Produktionsprozesse, Informationen zu verfügbaren Werkzeugmaschinen und Fertigungsmitteln sowie Technologieparameter. Der Fertigungsplaner nutzt diese Ablaufarbeitsplandaten, um das 3D-Produktmodell in eine Abfolge von Fertigungszuständen zu wandeln [9].

Die rechnerunterstützte Fertigungsplanung (englisch: Computer-Aided Process Planning, CAPP) unterstützt den Fertigungsplaner bei dieser Tätigkeit durch die weitgehend automatisierte Ableitung des Ablaufarbeitsplans aus dem 3D-Produktmodell, indem die Geometrie des 3D-Produktmodells durch algorithmisierte Verfahren oder Entscheidungstabellen in die einzelnen Arbeitsvorgänge des Ablaufarbeitsplans überführt werden [66, 82, 128, 150].

Die Rückführung der abgeleiteten Arbeitspläne in vorgelagerte Produktentwicklungsprozesse wird derzeit nach DENKENA nicht verfolgt und durch kommerzielle Anwendungssysteme zurzeit auch nicht unterstützt [7, 29]. Für Werkstücke als Informationsträger hat dieses Vorgehen eine Unterbrechung des Informationsflusses zwischen CAD und CAPP zur Folge. Die durchgängige

2 Stand der Technik und Forschung

Informationsbereitstellung und -verarbeitung des 3D-Produktmodells für werkstückindividuelle Fertigungszustände wird derzeit daher mit der Prozesskette CAD-CAPP nicht sichergestellt.

Prozesskette CAD-rechnerunterstützte Fertigung

Anwendungssysteme zur rechnerunterstützten Fertigung (englisch: Computer-Aided Manufacturing, CAM) dienen der Generierung von Teilarbeitsvorgangfolgen innerhalb des Ablaufarbeitsplans. Der Schwerpunkt der Prozesskette CAD-CAM liegt dabei insbesondere in der rechnerunterstützten Erstellung von Programmen für numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen, Roboter und Handhabungsgeräte sowie Messmaschinen [66, 128].

Das 3D-Produktmodell wird dazu mit technologischen Daten zu verfügbaren Werkzeugen, Werkstoffen sowie Schnittwerten sowie Arbeitsanweisungen ergänzt [128]. Die anschließende Simulation von Relativbewegungen der Werkzeuge im Bezug zum Werkstück sowie von Schnittverläufen erlaubt die Darstellung von Werkstückzwischenzuständen (englisch: In Progress Modell, IPM) [22, 93]. Die IPM dienen nachfolgend der Generierung der NC-Programme für die numerische Steuerung. Weder die IPM, noch die NC-Programme werden derzeit den nachgelagerten Prozessen in der Fertigung zugeführt, obwohl entsprechende wissenschaftliche Konzepte hierfür bereits existieren [22]. Werkstücke als Informationsträger haben also in der nachgelagerten Fertigung keinen Zugriff auf die IPM. Die Prozesskette CAD-CAM unterstützt somit nicht die durchgängige Informationsbereitstellung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen.

2.2.3 Rechnerunterstützte Fertigungssteuerung

Die virtuelle Produktentstehung von Werkstücken als Informationsträger wird in der Herstellungsphase durch Produktionssysteme unterstützt [135, 138]. Zu diesen Systemen zählen Systeme zur Planung von Unternehmensressourcen

(englisch: Enterprise Resource Planning, ERP), zur Produktionsplanung und -steuerung (PPS), zu leitstandsorientierten Planungen (englisch: Advanced Planning and Scheduling, APS) sowie die Fertigungsmanagementsysteme (englisch: Manufacturing Execution Systems, MES).

ERP-/PPS-Systeme werden in der industriellen Praxis zur Grobplanung der auftragsbezogenen Fertigung mit Planungshorizonten von einer Arbeitsschicht eingesetzt [79, 135, 145]. Sie dienen dabei der rechnerunterstützten, organisatorischen Planung und Steuerung für die „*termingerechte und auftragskonforme Erfüllung der Kundenaufträge*“ [68]. APS-Systeme dienen der Feinplanung der Fertigung [79, 145]. Sie zielen vorwiegend auf die Belegungsplanung ab [79].

Für die Fertigungssteuerung und das Fertigungsmanagement sind jedoch Funktionalitäten zur prozessnahen Planung und Steuerung erforderlich [79, 135]. MES bieten diese Funktionalität [79, 135]. Sie erlauben die zeitnahe Planung und Steuerung der Fertigungsprozesse, gewährleisten dabei die Prozesstransparenz und bilden simultan den Material- und Informationsfluss ab [135].

Prozesskette CAD-Fertigungsmanagementsysteme

Die Prozesskette *CAD-MES* spielt eine zentrale Rolle bei Steuerung der Fertigung durch Werkstücke als Informationsträger. Sie zielt auf die durchgehende Bereitstellung von Produkt- und Fertigungsunterlagen in der Fertigung. Durch ihre Vernetzung bilden dabei MES die Schnittstelle zwischen den Systemen zur Unternehmensressourcenplanung wie ERP-, PPS- und APS-Systemen sowie den Systemen der Automation wie den Maschinen- und Anlagensteuerungen [79]. Werkstücke als Informationsträger sind in diese IKT-Infrastruktur eingebunden und übernehmen teilweise sogar deren Funktionen (vgl. Kapitel 2.1.2).

In der wissenschaftlichen Forschung und in der industriellen Praxis existieren Integrationskonzepte, um die Arbeitspläne aus der CAPP in die

2 Stand der Technik und Forschung

ERP-/PPS-Systemen zu übernehmen und um anschließend die auftragsbezogenen Daten zu ergänzen [23, 83, 79]. Meist wird dabei zur durchgehenden Verwendung der Produktstruktur die Stückliste der Produktentwicklung (englisch: Engineering Bill of Material, EBOM) in eine Stückliste für die Fertigung (englisch: Manufacturing Bill of Material, MBOM) transformiert [83, 120]. Die auftragsbezogenen Daten werden anschließend mit dieser MBOM verknüpft [23].

Die erstellten Arbeitspläne werden dem MES-System als Vorgabezustand (Soll-Situation) übergeben [79]. Das MES-System kann die Soll-Situation mit der aktuellen Situation (Ist-Situation) aus der Fertigung dagegensetzen. Das MES-System wertet dazu in der *Prozessdatenverarbeitung* (englisch: *Plant Data Collection, PDC*) die durch die Betriebs-, Maschinen- und Prozessdatenerfassung bereitgestellten Zustandsdaten zu Prozesswerten aus. Zu den Prozesswerten zählen beispielsweise der Materialverbrauch, die Abnutzung von Betriebsmitteln, die Zuordnung von Maschinen, Umgebungstemperaturen und -drücke sowie Toleranz- und Eingriffsgrenzen. Die PDC erfasst diese Prozesswerte, verifiziert sie gegenüber den Toleranz- und Eingriffsgrenzen und leitet bei Abweichungen konkrete Gegenmaßnahmen ein [79].

Die Verwaltung und Auswertung dieser Daten und Maßnahmen ist Bestandteil der Qualitätssicherung, insbesondere der Qualitätsprüfung [66, 67]. In der Qualitätsprüfung werden Merkmale des Werkstücks und der beim Herstellungsprozess mit dem Werkstück assoziierten Prozesse im Hinblick auf die Erfüllung vorgegebener Qualitätsanforderungen überprüft [66]. Im Kontext der werkstückgetriebenen Fertigung sind für die Qualitätsprüfung die Einhaltung der vorgegebenen Werkstücktoleranzen und die Einhaltung der vorgegebenen Prozessparameter von Bedeutung. Beides wird in der Fertigung durch die Anwendung der statistischen Qualitätsmethoden sichergestellt. Dazu zählen nach HERING ET AL. und nach HEHENBERGER die rechnerunterstützte, statistische Prozessregelung sowie die Methode Six-Sigma.

Im Rahmen der rechnerunterstützten, *statistischen Prozessregelung* (englisch: *Statistical Process Control, SPC*) werden die erfassten und nach statistischen Ge-

sichtspunkten ausgewerteten Daten des Werkstücks und des Prozesses sowie deren Verlauf über digitale Qualitätsregelkarten angezeigt [66, 67, 145]. Für die Auswertung werden Regelgrenzen definiert, ab deren Überschreitung regelnd in den Fertigungsprozesse eingegriffen wird [67, 138]. Aus der Auswertung resultieren Prozessparameter als Stellgröße, mit denen der Fertigungsprozess im Sinne einer Regelstrecke und die zu fertigenden Werkstückmerkmale als Regelgröße geregelt werden [67, 107, 145].

Die Qualitätsmethode *Six-Sigma* beinhaltet die statistische Auswertung der Abweichung von Werkstücke und Prozessen von einer vorab definierten Spezifikation [60, 66]. Six-Sigma interpretiert dabei die erfassten Werkstück- oder Prozessdaten als Gaußsche Normalverteilungen [66], auf deren Berechnungsgrundlage der Abstand zwischen dem arithmetischen Mittelwert und dem Wendepunkt der Kurve der Normalverteilung berechnet wird [60, 66]. Die Methode Six-Sigma zielt auf die Erreichung einer Streubreite von 6σ , also einer Fehlermöglichkeit von 3,4 Fehlern pro einer Millionen Teile [60, 66, 145]. Die MES steuern die Fertigungsprozesse zur Einhaltung der Fehlerbreite entsprechend nach.

In der werkstückgetriebenen Fertigung fokussiert die Prozesskette CAD-MES einerseits auf die Herstellung von Werkstücken nach vorgegebenen Ablaufarbeitsplänen und andererseits auf die Sicherstellung qualitätsrelevanter Merkmale durch die Auswertung von erfassten Daten aus der Fertigung und die Anwendung der beschriebenen Maßnahmen zur Qualitätsprüfung. MES müssen dazu werkstückindividuelle Fertigungszustände erfassen und für die Steuerung der Fertigung verarbeiten. Bei der Prozesskette CAD-MES ist die Durchgängigkeit der Informationsprozesse zwischen den IKT-Systemen des CAD und dem MES jedoch nicht gegeben. Das 3D-Produktmodell wird zwar in den Arbeitsablaufplan transformiert, eine nachträgliche Zuordnung von erfassten Werkstückdaten zum 3D-Produktmodell ist jedoch nicht mehr möglich. Auch die werkstückindividuelle, semantische Verarbeitung der erfassten Daten zur Steuerung der werkstückindividueller Fertigungszustände ist mit heutigen

Anwendungssystemen nicht gegeben. Stattdessen aggregieren die SPC und Six-Sigma die erfassten Daten zur Prozessregelung und -überwachung des Gesamtsystems zu statistischen Kenngrößen.

Prozesskette CAD-rechnerunterstützten Qualitätssicherung

Neben der Qualitätsprüfung werden in der werkstückgetriebenen Fertigung rechnerunterstützte, qualitätssichernde Maßnahmen eingesetzt. Die Prozesskette *CAD-rechnerunterstützten Qualitätssicherung* (englisch: Computer-Aided Quality Assurance, CAQ) spielt in diesem Zusammenhang eine zentrale Rolle. Sie berücksichtigt, dass gefertigte Werkstücke während der Fertigung systembedingten Schwankungen unterliegen [66], also der realisierte Fertigungszustand (Ist-Zustand) vom geplanten Fertigungszustand (Soll-Zustand) abweicht [66]. Die Aufgaben der CAQ liegen in diesem Zusammenhang nach BENES in der Ermittlung von Ursachen, die zu Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Zustand geführt haben [18]. Diese werden durch Auswertung von Basisdaten identifiziert und Gegenmaßnahmen unter anderem durch die MES-Systeme eingesteuert [18]. Im Kontext der vorliegenden Dissertation ist insbesondere die Rückführung von erfassten Qualitätsmerkmalen von Relevanz. Messmittel werden dazu an das MES-System angebunden und informationstechnisch integriert [67].

CAQ-Systeme verarbeiten die Prüfpläne, um die Qualitätsdaten des Werkstücks zu erfassen und für die weitere Verarbeitung brauchbare Auswertungen zu erstellen [67]. Diskrete Messpunkte werden dazu während des Prüfvorgangs erfasst und mit den festgelegten Toleranzangaben oder der definierten Soll-Geometrie aus dem 3D-Produktmodell verglichen. Eine Anbindung von Werkstücken als Informationsträger an CAQ-Systeme, damit diese eigenständige Auswertungen durchführen und Entscheidungen zur Prozesssteuerung treffen können, ist mit derzeitigen Ansätzen jedoch nicht realisiert. Stattdessen erfolgt die Prozesssteuerung übergreifend und ganzheitlich für alle Werkstückherstellungsprozesse über MES. Im Sinne der werkstückgetriebenen Fertigung muss die Auswertung

jedoch durch das Werkstück durchgeführt werden. Dazu müssen die digitale Repräsentation des Werkstücks und die erfassten Prüfdaten semantisch verknüpft sein, um während der Qualitätsprüfung erfasste Messgrößen in Bezug zu geplanten Soll-Werten rechnerinterpretierbar auswerten zu können.

2.2.4 Fazit

Eine durchgängige Prozesskette für werkstückindividuelle Fertigungszustände von der Produktentwicklung bis zum einzelnen Werkstück als Informationsträger ist mit den betrachteten Ansätzen der Forschung und Technik derzeit nicht konzipiert. Die zu erreichenden Qualitätsmerkmale von den zu fertigenden Werkstücken, die in der Fertigung realisiert werden sollen, werden zwar in den vorgelagerten Prozessen des CAD, der TPD, der CAPP und der CAM definiert, aber eine Weiterverarbeitung in den Informationsprozessen im MES oder in der CAQ geschieht nur unvollständig. Stattdessen werden die Produkt- und Fertigungsunterlagen in den Prozessketten transformiert und damit im Informationsgehalt reduziert bereitgestellt oder sogar der Informationsfluss an definierten Informationsentkopplungspunkten unterbrochen.

Das 3D-Produktmodell in Kombination mit dem Ablaufarbeitsplan bildet jedoch bereits mit den bestehenden Ansätzen alle für die Fertigung einzelner Werkstücke erforderlichen Daten mit Ausnahme des individuellen Werkstückverhaltens ab. Eine CAx-Prozesskette, die die Informationsverarbeitung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen bis zum einzelnen Werkstück sicherstellt, ist erforderlich. Das 3D-Produktmodell muss dabei mit dem Werkstückinformationsmodell verknüpft werden, um individuelle Werkstückmerkmale abzubilden und damit deren Auswertung als Entscheidungsgrundlage zur Steuerung des individuellen Herstellungsprozesses in der werkstückgetriebenen Fertigung zur Verfügung zu stellen.

ANDERL hat dazu ein Konzept entwickelt, dass das 3D-Produktmodell auf Basis geplanter Arbeitsvorgänge in geplante Fertigungszustände überführt [9]. AN-

2 Stand der Technik und Forschung

DERL leistet mit seinem Ansatz somit wichtige Vorarbeit für die Repräsentation von werkstückindividuellen Fertigungszuständen. Der Ansatz berücksichtigt jedoch nicht die gesamte Prozesskette. Insbesondere die Herstellungsphase von individuellen Werkstücken wird nicht betrachtet.

ROLLMANN stellt ein Konzept zur Verknüpfung der Konstruktion und der Produktherstellung über die Produktionsprozessplanung vor [113]. Konstruktionsfeatures aus dem CAD werden nach dem Ansatz von ROLLMANN in Fertigungsfeatures abgeleitet, die die Modellierung einer validen Bearbeitungsreihenfolge unterstützen [113]. Diese Prozesskette beinhaltet jedoch auch nicht die Herstellungsphase der Werkstücke.

ABELE ET AL. stellen ein Konzept vor, um das 3D-Produktmodell und die automatische Geometrieerfassung in der Fertigung zu verknüpfen [1]. Sie leiten dazu aus dem 3D-Produktmodell Messbahnen zur Bauteilvermessung ab [1]. Ein Ist-Soll-Vergleich zwischen der erfassten Werkstückgeometrie und dem 3D-Produktmodell erfolgt durch Transformation und Bereinigung der gemessenen Punktwolke im CAD-System [1]. Der durchgängige Informationsfluss zwischen dem 3D-Produktmodell und dem Werkstück wird jedoch nicht sichergestellt. Insbesondere fehlt eine Semantik zwischen Werkstückgeometrie und dem 3D-Produktmodell und damit die Verknüpfung von geplanten und realisierten Fertigungszuständen.

Die weitere Anreicherung des 3D-Produktmodells für die Bereitstellung produktbezogener ergänzender Informationen in nachgelagerten CAx-Prozessketten der Fertigung wird unter anderem durch GILSDORF verfolgt. Gilsdorf ergänzt semantische Produktannotationen zu sicherheitskritischen Merkmalen [59]. Der Leistungsumfang derzeitiger IKT-Systeme erlaubt bereits die Weiterverarbeitung dieser semantischen Produktannotationen. Eine Verarbeitung durch Werkstücke als Informationsträger innerhalb von CAx-Prozessketten ist derzeit wissenschaftlich nicht durchdrungen.

BENGEL stellt einen werkstückzentrierten Ansatz vor, der die geforderte CAx-

Prozesskette vom CAD in die Fertigung anvisiert [19]. Der Ansatz zielt jedoch insbesondere auf die Generierung eines Fertigungsgraphen ab [19]. Ein semantisches Werkstückinformationsmodell, das die Werkstückmerkmale mit den Produktmerkmalen für die Steuerung des Herstellungsprozesses in Bezug setzt, wird durch diesen Ansatz nicht adressiert.

In den dargestellten Prozessketten ist der Informationsfluss von vor- auf nachgelagerte Prozesse gerichtet. Falls ein Informationsrückfluss vorgesehen ist, wird dieser ausschließlich über zusätzliche Informationswege realisiert. Eine bidirektionale Verknüpfung zwischen den geplanten Fertigungszuständen aus dem 3D-Produktmodell und den zu realisierenden beziehungsweise realisierten Werkstückzuständen ist in keiner der analysierten Prozesskette gegeben. Die bidirektionale Verknüpfung von Werkstück mit dem Produktmodell und insbesondere dessen semantische Verarbeitung sind jedoch für die Steuerung der werkstückgetriebenen Fertigung durch das einzelne Werkstück erforderlich. Der Abgleich von Soll- und Ist-Zustand durch die Auswertung von definierten Qualitätsmerkmalen bildet die Entscheidungsgrundlage für die Aushandlung der Prozessparameter und Bearbeitungsreihenfolge im Herstellungsprozess.

2.3 Grundlagen des Datenmanagement

Für die effiziente Durchführung der einzelnen Phasen des Werkstücklebenszyklus spielen die Methoden des Datenmanagements und der Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien für Ingenieurstätigkeiten eine wesentliche Rolle [49, 139]. Methoden des Datenmanagements und der Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien zielen auf die Integration von CAx-Prozessen durch Produktdatenmanagement, Produktdatenaustausch und Langzeitarchivierung von Produktdaten ab [56]. In der industriellen Praxis werden daher IKT-Systeme wie die Produkt- und die Fabrikdatenmanagementsysteme sowie die semantischen Produktgedächtnisse und die MES eingesetzt.

2 Stand der Technik und Forschung

Sie dienen der Verwaltung und Integration von Daten, Dokumenten und deren Strukturen [14, 100].

Das Produktdatenmanagement (PDM) bezeichnet nach KRASTEL im Speziellen „*das produktbezogene Informationsmanagement des gesamten Produktlebenszyklus in einem Unternehmen und umfasst darüber hinaus auch die Planung, Steuerung und Kontrolle (Organisation) der zur Erzeugung und ganzheitlichen Verwaltung dieser Daten, Dokumente und Ressourcen erforderlichen Prozesse*“ [81].

Das Fabrikdatenmanagement (FDM) zielt auf „*die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik mit dem Produkt*“ [136] ab, indem es „*über Verknüpfungen Bezüge zwischen allen relevanten Daten des Produktentstehungsprozesses bezogenen auf das Produkt, die Ressource, den Prozess und das Projekt*“ [136] herstellt.

In der industriellen Praxis kommen für dieses Datenmanagement drei unterschiedliche Systemarchitekturen zum Einsatz:

- das integrierte Datenmanagement,
- das verteilte Datenmanagement und
- das föderierte Datenmanagement [3, 81, 92, 93, 109].

Alle Systemarchitekturen zielen auf die Integration der Daten, Dokumente und Strukturen aus den im Produktentstehungsprozess genutzten IKT-Systemen [81]. Das *integrierte Datenmanagement* integriert dazu alle Daten, Dokumente und Strukturen der IKT-Systeme in einem Datenbanksystem [93]. Beim *verteilten Datenmanagement*, auch als autonomes Datenmanagement bezeichnet, werden die IKT-Systeme autonom betrachtet und die Integration über definierte Austauschformate realisiert [3]. Beim *föderierten Datenmanagement* werden die Daten, Dokumente und Strukturen lose über definierte Schnittstellen gekoppelt [13, 89, 92, 109].

In der virtuellen Produktentstehung von Werkstücken als Informationsträger sind die Datenstrukturen der digitalen Repräsentation in föderierten Datenbeständen bereitgestellt. Die damit zusammenhängende Informationsbereitstellung und -weitergabe im Rahmen von CAx-Prozessketten durch Datenmanagementsysteme, insbesondere durch föderierte Datenmanagementsysteme, kommt im Kontext der vorliegenden Dissertation damit eine zentrale Rolle zu.

2.3.1 Freigabeprozesse

Die Produktdaten durchlaufen ebenfalls verschiedene Lebensphasen. Nach DIN 11442 zählen dazu die Erstellungs-, die Genehmigungs-, die Freigabe-, die Nutzungs-, die Änderungs- und die Archivierungsphase [41]. Während jeder Phase existieren die einzelnen Informationseinheiten der Produktdaten in verschiedenen Reifegraden. Diese werden über den Status des Lebenszyklus festgelegt. Zu den Status zählen beispielsweise:

- in Erstellung,
- in Überprüfung,
- genehmigt,
- freigegeben,
- ersetzt und
- zurückgezogen [41].

Der Übergang von einer in die nächste Phase wird über Freigabeprozesse geregelt [41, 56]. Die Freigabe einer Datenstruktur bezeichnet dabei die Prüfung und Genehmigung der Unterlagen und deren Dokumentation [34].

Während ihres Produktlebenszyklus durchlaufen die Produktdaten unterschiedliche Freigabeprozesse. Dazu zählen nach DIN 6789 TEIL 5:

2 Stand der Technik und Forschung

- die Konstruktionsfreigabe als Freigabe für gestaltende Tätigkeiten zur Realisierung bestimmter Funktionen und/oder Formen nach vorgegebenen Bedingungen,
- die Fertigungsplanungsfreigabe als Freigabe zur Festlegung von Prozessabläufen und des voraussichtlichen Bedarfs an Maßnahmen und
- die Fertigungsfreigabe als Genehmigung zum Fertigen des Produkts [34].

Neben der Dokumentation der Prüfung werden beim rechnerunterstützten Datenmanagement im Rahmen der Freigabe auch Maßnahmen zur Sicherstellung der Zugriffsberechtigungen und die Kennzeichnung des Lebenszyklusstatus durchgeführt [34]. Zu diesen Maßnahmen zählt insbesondere die Gewährleistung des Schreibschutzes freigegebener Datenstrukturen [34]. Die Freigabe löst dazu eine Statusänderung aus, über die die Rechte für den Schreibzugriff auf die geprüften Datenstrukturen durch Maßnahmen der Systemsteuerung eingeschränkt werden [34].

In rechnerunterstützten Datenmanagementsystemen werden Freigabeprozesse über Arbeitsabläufe (englisch: Workflows) realisiert [56]. Diese Arbeitsabläufe regeln in der industriellen Praxis neben der Freigabe auch die Weitergabe der Datenstrukturen an die Verantwortlichen der nachgelagerten CAx-Prozesse [116]. Bei der Konstruktionsfreigabe zählen zu den Verantwortlichen die Konstrukteure, bei der Fertigungsplanungsfreigabe umfassen die Verantwortlichen die Fertigungsplaner und bei der Fertigungsfreigabe werden die Informationen an die Fertigung weitergegeben [34, 116]. In der werkstückgetriebenen Fertigung muss dieser Arbeitsablauf zur Fertigungsfreigabe auch die Weitergabe der Fertigungsunterlagen an die Werkstücke als Informationsträger umfassen beziehungsweise deren Zugriff auf die Fertigungsunterlagen regeln, insbesondere der schreibende Zugriff über die Herstellungsphase [2].

2.3.2 Serviceorientierte Architektur

Vor dem Hintergrund föderierter Datenbestände bietet die Nutzung der serviceorientierten Architektur (SOA) eine Möglichkeit für das föderierte Datenmanagement. Sie berücksichtigt bei der Freigabe von föderierten Datenbeständen die lose Koppelung von Daten, Dokumenten und Strukturen der IKT-Systeme (vgl. Kapitel 2.3).

SOA ist ein konzeptioneller Ansatz für örtlich verteilte IKT-Infrastrukturen, der die Funktionalitäten der IKT-Applikationen kapselt und über sogenannte Dienste (englisch: Services) anbietet [64, 89]. Ein Dienst stellt dabei nach HEUTSCHI eine „abstrakte [...] Schnittstelle dar, die anderen Applikationen über ein Netzwerk einen standardisierten Zugriff auf Anwendungsfunktionalität anbietet“ [69]. SOA bietet damit den Vorteil der Interoperation heterogener IKT-Systeme, den Vorteil einer reduzierten Komplexität und einer verbesserten Beherrschbarkeit der IKT-Infrastruktur bei gleichzeitiger, bedarfsabhängiger Koppelung der IKT-Werkzeuge [110, 119].

Für die Koppelung der Dienste in SOA sind standardisierte Kommunikationsschnittstellen erforderlich. Nach RICHTER [110] und ZASLAVSKY [151] existieren konkurrierende Ansätze für deren Implementierung. Dazu zählt unter anderem das Programmierparadigma für verteilte Systeme *REpresentational State Transfer (REST)*.

REST stellt Dienste als webbasierte Schnittstelle zur Anwendungsprogrammierung (englisch: Application Programming Interface, API) über das Internetprotokoll Hypertext Transfer Protocol (HTTP) bereit, nachfolgend als Webdienst bezeichnet (vgl. Abbildung 2.5). Webdienste nach dem REST-Paradigma bestehen dabei aus drei Schichten [52, 88, 119]:

- dem Nutzer des Webdienstes (englisch: Client), der einen gewünschten Webdienst auswählt und durch das Absenden einer Anfrage aufruft,

2 Stand der Technik und Forschung

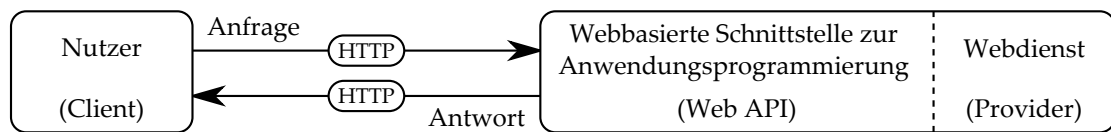


Abbildung 2.5: Bereitstellung von Webdiensten über webbasierte Schnittstellen zur Anwendungsprogrammierung in Anlehnung an [88]

- der webbasierten Schnittstelle zur Anwendungsprogrammierung, in der die Funktionalität des Webdienst gekapselt und standardisiert bereitgestellt wird sowie
- der Webdienst (englisch: Server), der für jede Ressource seine Funktionalitäten als sogenannte Operationen anbietet.

Eine Ressource bezeichnet dabei nach FIELDING „a conceptual mapping to a set of entities“ [52], also auf eine Anfrage zusammengestellte und dem Nutzer bereitgestellte Datenstruktur. Die Operationen übernehmen die Editierung der Datenstrukturen. Die Ressource stellt damit eine Schnittstelle zwischen Nutzer und Webdienst zur Synchronisation der bereitgestellten Datenstrukturen bereit.

Werkstücke als Informationsträger sind über die webbasierten IKT-Schnittstellen (vgl. Kapitel 2.1.1) nahtlos in die Informationsprozesse der SOA nach dem REST-Ansatz integrierbar [102, 103]. Ansätze, um diese Integration für durchgängige CAx-Prozessketten zu nutzen, sind derzeit jedoch nicht bekannt.

2.3.3 Fazit

Bezogen auf Werkstücke als Informationsträger erlaubt das föderierte Datenmanagement die Nutzung verteilter Datenbestände und deren Integration. Arbeitsabläufe können die Freigabe und Weitergabe versionierter Datenstrukturen an alle Prozessbeteiligten regeln, so auch an Werkstücke als Informationsträger insbesondere in der Herstellungsphase.

MONTAU nutzt das föderative Datenmanagement für die föderative Koordination von IKT-Systemen im Kontext des Produktdatenmanagements [92]. Die Integration von föderierten IKT-Systemen aus der Fertigung wie beispielsweise Werkstücke als Informationsträger wird nicht betrachtet.

SPRENGER nutzt diesen Ansatz, um produktbezogene Informationen und das 3D-Produktmodell bidirektional zu verknüpfen [121]. Der Ansatz von SPRENGER definiert in diesem Zusammenhang eine Methode zur strukturierten Identifizierung produktbezogener Informationen über Webtechnologien auf Basis von REST [121]. Die Identifizierung erlaubt die Wiederauffindung und die Bereitstellung produktbezogener Informationen aus verteilten Informationsquellen [121]. SPRENGER beschränkt sich mit diesem Ansatz jedoch auf die Produktentwicklung. Die CAx-Prozessketten der Fertigung werden nicht betrachtet.

REZAEI hingegen nutzt den Ansatz des föderierten Datenmanagement zur Unterstützung insbesondere der Fabrikplanung [109]. Er entwickelt dazu das Fabrikinformationsmanagement auf Basis postrelationaler Datenbanken, das zum einen die fabrikdefinierenden Daten verwaltet und zum anderen die Integration von fabrikrepräsentierenden Modellen über deren Phasen der Fabrikentstehung sicherstellt [109]. REZAEI berücksichtigt jedoch keine föderierten Datenstrukturen aus der Fertigung und damit auch keine individuellen Werkstücke.

MOSCH entwickelt einen Ansatz, um föderierte Datenstrukturen aus der Fertigung insbesondere zu mikrogeometrischen Daten in die Ablaufarbeitsplanung zu integrieren. Der Ansatz nutzt dabei das föderative Fabrikdatenmanagement für die Ablaufarbeitsplanung [93], um die gefertigten, mikrogeometrischen Daten einzelner Herstellungsprozesse zu aggregieren, die ihrerseits die realisierbaren Fertigungsprozesse charakterisieren [93]. Die realisierbaren Fertigungsprozesse werden bei der Ablaufarbeitsplanung dem Fertigungsplaner zur Berücksichtigung der zulässigen, mikrogeometrischen Daten zur Verfügung gestellt [93]. MOSCH definiert damit zwar teilweise individuelle Werkstückinformationen, er unterscheidet jedoch in seinem Ansatz nicht die einzelnen

Werkstücke. Eine durchgängige Prozesskette vom 3D-Produktmodell zur Fertigung einzelner Werkstücke ist nicht realisiert.

Bestehende Ansätze der Forschung haben das Potential des föderierten Datenmanagement erkannt, um die verteilten Datenbestände von Werkstücken als Informationsträger zu verknüpfen und die Informationsflüsse zu strukturieren. Das föderierte Datenmanagement liefert dabei jedoch nur die Grundlagen und die Hilfsmittel für die Realisierung einer durchgehenden Prozesskette vom CAD zum einzelnen Werkstück. Nach dem untersuchten Stand der Technik und Forschung ist die CAx-Prozesskette zur Ausprägung werkstückindividueller Fertigungszustände derzeit jedoch noch nicht realisiert.

2.4 Fazit und Potenziale

Die Informationsprozesse der virtuellen Produktentstehung von Werkstücken als Informationsträger weisen eine Vielzahl an unterschiedlichen IKT-Systemen, an Schnittstellen und an Medienbrüchen auf. Zu den Informationsprozessen zählen:

- Herzustellende Produkte werden über CAD entwickelt und in die technische Produktdokumentation abgeleitet,
- Fertigungsprozesse werden in Ablaufarbeitspläne durch CAPP abgebildet,
- Aufträge und Fertigungsprozesse werden in den MES-Systemen oder durch die Werkstücke als Informationsträger gesteuert und
- Betriebs-, Prozess- und Maschinendaten werden von den Maschinen, Anlagen und Werkstücken gesammelt und über integrierte Schnittstellen an die IKT-Systeme der Fertigungsumgebung zurückgemeldet [79].

In der werkstückgetriebenen Fertigung übernehmen Werkstücke als Informationsträger die zentrale Organisation der Produktion und ersetzen sie durch

vernetzte, dezentral organisierte Strukturen (vgl. Kapitel 2.1.2). Die Informationsprozesse müssen sich wandeln, damit Werkstücke als Informationsträger in die bestehenden Informationsprozesse eingebunden werden können. Diese Werkstücke müssen mit ihrer Fertigungsumgebung interagieren und eigenständig Entscheidungen treffen, um ihren Herstellungsprozess aktiv zu steuern (vgl. Kapitel 2.1.2). Voraussetzung für die Steuerung ist die digitale Repräsentation zu geplanten und zu realisierten Fertigungszuständen, die aus den Produkt- und Fertigungsunterlagen abgeleitet werden müssen.

Die Modellierung der zugrundeliegenden Produktdefinition und des Ablaufarbeitsplans der Werkstücke als Informationsträger erfolgt durch Methoden und Werkzeuge während der Phasen der virtuellen Produktentwicklung. Trotz des beachtlichen Leistungsumfangs definieren diese Methoden und Werkzeuge nur die formale Beschreibung des Produkts, nicht jedoch des werkstückindividuellen Fertigungszustands. In den sich anschließenden, analysierten CAx-Prozessketten werden die Produkt- und Fertigungsunterlagen noch unvollständig für die weitere Verarbeitung in der Fertigung bereitgestellt. Potential für ergänzende Forschung bietet daher die wissenschaftliche Untersuchung zur formalen Abbildung des individuellen Werkstücks in einem Werkstückinformationsmodell über alle Phasen des Werkstücklebenszyklus über den Ansatz von werkstückindividuellen Fertigungszuständen.

Potential für diese wissenschaftliche Durchdringung liefern die Methoden der virtuellen Produktentstehung und des föderierten Produktdatenmanagements. Sie erlauben es, die etablierten Vorgehensweisen zur Modellierung der geometrischen Gestalt und der Produktattribute auf die Modellierung des Werkstückmodells zu übertragen. Die rechnerunterstützte Fertigungsplanung bildet über die Gestaltung der Arbeitsablaufpläne die logische Integrationsschnittstelle für die Verknüpfung der geplanten Fertigungszustände mit den in der werkstückgetriebenen Fertigung physisch realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszuständen.

2 Stand der Technik und Forschung

3

Anforderungsprofil

Das Anforderungsprofil wird für die Konzeptionierung und an die daran anschließende Überprüfung der Tragfähigkeit des Konzepts im nachfolgenden Kapitel erstellt. Zur Erstellung wird der Ansatz von OESTEREICH ET AL. [99], ROBERTSON ET AL. [111] sowie RUPP [114] zur Identifikation, Klassifikation und Dokumentation der Anforderungen verfolgt. Dazu wird im vorliegenden Kapitel zunächst die Zieldefinition aus dem vorgestellten Handlungsbedarf hergeleitet. Anschließend werden Systemanwendungsfälle als prozessuale Anforderungen definiert. In der vorliegenden Dissertation werden diese Anforderungen in Anwendungsfalldiagrammen definiert. Sie beschreiben die strukturellen Zusammenhänge zwischen Systemverhalten, -grenzen und -akteuren. Daraus werden die funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen an das Konzept und die Testfälle zur Überprüfung der Tragfähigkeit des Konzepts ermittelt.

3.1 Zieldefinition

Um ihre individuelle Herstellung in der werkstückgetriebenen Fertigung zu steuern, verarbeiten Werkstücke als Informationsträger Informationen zu ihren geplanten sowie ihren realisierten Fertigungszuständen, treffen eigenständig Entscheidungen und kommunizieren mit anderen Fertigungsressourcen. Während für die Realisierung dieser werkstückgetriebenen Fertigung der Leistungsumfang der virtuellen Produktentwicklung und der Fertigungsplanung einerseits sowie die technische Umsetzung von Werkstücken als Informationsträger andererseits bereits wissenschaftlich durchdrungen ist, besteht für die durchgehenden Informationsprozesse der virtuelle Produktentstehung weiterhin Forschungsbedarf (vgl. Kapitel 2).

3 Anforderungsprofil

Die informationstechnisch durchgängige Verarbeitung von der Produktentwicklung bis zur werkstückgetriebenen Fertigung muss sichergestellt werden. Ein integriertes Informationsmodell ist dazu notwendig, um die während der Fertigung erfassten Informationen zum Fertigungszustand werkstückindividuell zu persistieren, mit den Merkmalen aus den geplanten Fertigungszuständen zu verknüpfen und informationstechnisch als realisierte, werkstückindividuelle Fertigungszustände den Werkstücken als Informationsträger für die Steuerung der nachgelagerten Fertigungsprozesse bereitzustellen.

Das integrierte Werkstückinformationsmodell muss durch eine Methode ergänzt werden, um erstens im 3D-Produktmodell und im Ablaufarbeitsplan die geometrischen und nicht-geometrischen Merkmale zur Beschreibung der geplanten Fertigungszustände zu kennzeichnen und die zweitens den Übergang von geplanten Fertigungszuständen zu realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszuständen beschreibt.

Darüber hinaus muss die informationstechnische Bereitstellung und Verarbeitung der werkstückindividuellen Fertigungszustände innerhalb aller Prozesse der virtuellen Produktentstehung untersucht werden. Es bedarf geeigneter Werkzeuge, um die geplanten Fertigungszustände und die realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszustände aus vorangegangenen Entstehungsprozessen in eine menschenlesbare Präsentation zu überführen und den Prozessbeteiligten der virtuellen Produktentstehung bereitzustellen.

Um diese Ziele zu erfüllen, detailliert die vorliegende Dissertation einerseits die Spezifikation des erforderlichen integrierten Werkstückinformationsmodells und entwickelt andererseits die Methoden und Werkzeuge zur informationstechnischen Erstellung und Verarbeitung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen durch die Ausprägung des integrierten Werkstückinformationsmodells (vgl. Kapitel 4).

3.2 Betrachtete Anwendungsfälle

Zur Klärung der Systemgrenzen des Konzepts und der prototypischen Implementierung werden zunächst Anwendungsfälle identifiziert und daraus die funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen abgeleitet. Eine Übersicht über die identifizierten Anwendungsfälle gibt Abbildung 3.1 als Anwendungsfalldiagramm nach Notation der Unified Modeling Language (UML)¹.

3.2.1 Systemakteure

Die Systemakteure im Anwendungsfallkontext sind der Produktentwickler, der Fertigungsplaner und das Werkstück als Informationsträger. Alle beteiligten Akteure sind eindeutig identifizierbare Personen, virtuelle Objekte oder physisch existente Gegenstände. Abbildung 3.1 stellt die identifizierten Systemakteure im linken Abschnitt dar.

- **Produktentwickler:** Der Akteur Produktentwickler² beinhaltet im Anwendungsfallkontext den Konstrukteur in der virtuellen Produktentwicklung. Die Aufgabe des Produktentwicklers ist die rechnerunterstützte Modellierung der Stoffeigenschaften sowie der geometrischen und topologischen Gestalt des Produkts. Er muss die fertigungsspezifischen Informationen zu Materialeigenschaften, zur Dimensionierung, zu den Form- und Lagetoleranzen sowie zur Spezifikation der Oberflächeneigenschaften der zu fertigenden Werkstücke modellieren.
- **Fertigungsplaner:** Der Akteur Fertigungsplaner initiiert die rechnerunterstützte Erstellung der Fertigungsplanung. Seine Aufgabe umfasst dabei die Erstellung der Vorgaben für die Ausprägung der Datenstrukturen zur

¹ Weitere Informationen zu Anwendungsfalldiagrammen in der Unified Modeling Language finden sich unter anderem in [21, 55, 99, 98, 118, 146].

² Texte in Schreibmaschinenschrift referenzieren innerhalb des vorliegenden Kapitels Systemakteure, Fremdsysteme und Anwendungsfälle in Abbildung 3.1.

3 Anforderungsprofil

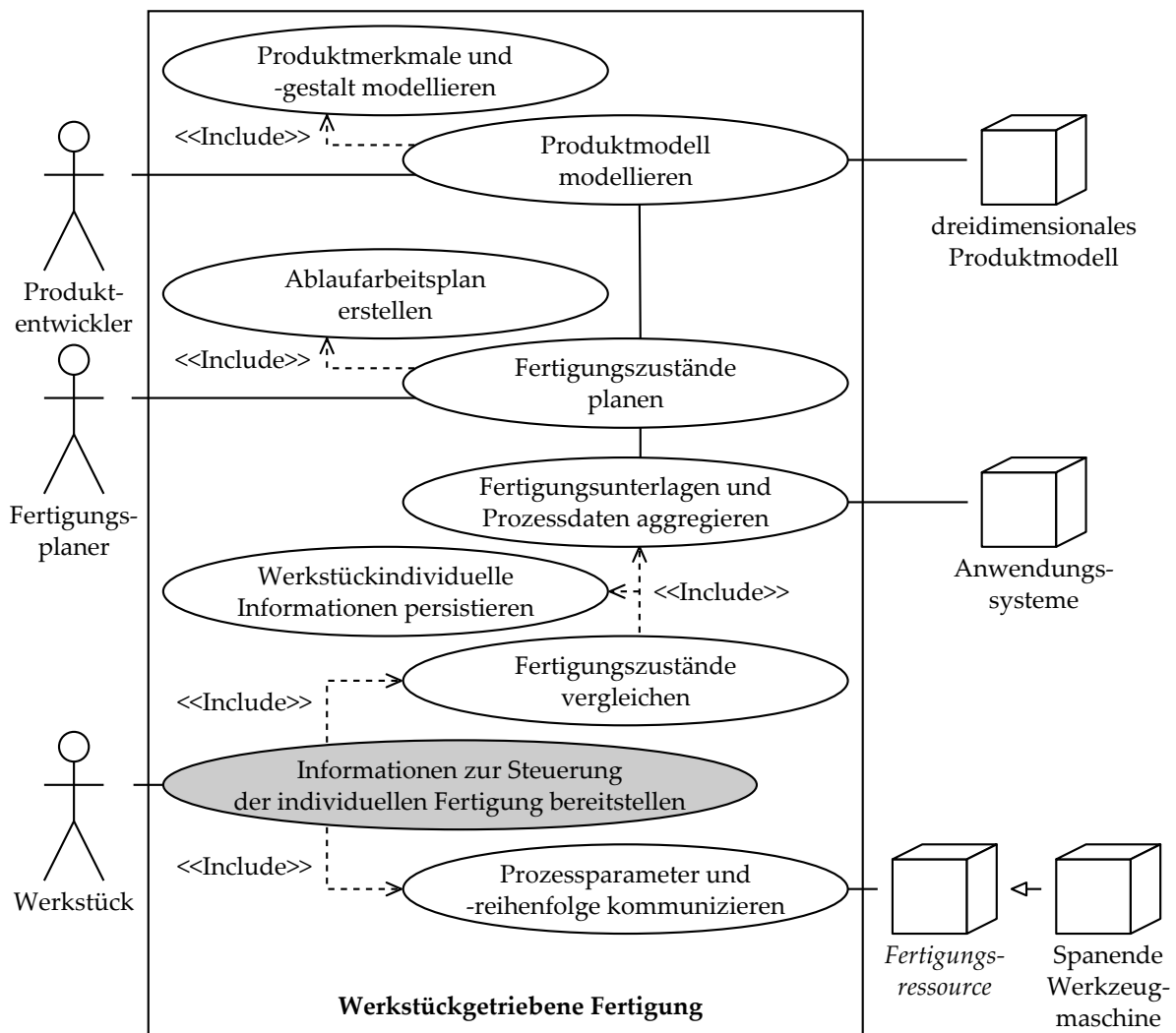


Abbildung 3.1: Betrachtete Anwendungsfälle als Anwendungsfalldiagramm in UML-Notation

Beschreibung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen. Der Fertigungsplaner erstellt dazu den Ablaufarbeitsplan unter Berücksichtigung von Prozesswissen vorangegangener Produktentstehungsprozesse.

- **Werkstück als Informationsträger:** Der Akteur Werkstück umfasst Werkstücke als Informationsträger. Das Werkstück bezeichnet eine Spezialform eines Einzelteils [38]. Werkstücke sind in der spanenden Fertigung einzelne, geometrisch bestimmte feste Körper [39], die unter Aufrechterhaltung ihrer grundlegenden Eigenschaften nicht weiter getrennt werden können [38].

Sie durchlaufen während des Fertigungsablaufs verschiedene Fertigungszustände (vgl. Kapitel 2.2).

Werkstücke als Informationsträger sind durch die Verschmelzung mit internetbasierten Informations- und Kommunikationstechnologien fähig, Informationen zu erfassen und zu verarbeiten sowie über Kommunikationsschnittstellen mit ihrer Fertigungsumgebung zu kommunizieren (vgl. Kapitel 2.1).

Die im Kontext betrachteten Fremdsysteme sind das 3D-Produktmodell, Anwendungssysteme für die virtuelle Produktentstehung sowie die Fertigungsressourcen. Abbildung 3.1 stellt die identifizierten Fremdakteure im rechten Abschnitt dar.

- **3D-Produktmodell:** Das Fremdsystem 3D-Produktmodell bezeichnet den strukturierten Datenbestand für die semantische Repräsentation des Produktmodells, insbesondere die topologisch-geometrische Struktur des 3D-Volumenmodells, welche ausschließlich durch semantische Produktannotationen bemaßt ist. Semantisch annotierte 3D-Produktmodelle werden durch Anwendungssysteme zum Produktdatenmanagement oder durch Produktdatenaustauschformate wie STEP bereitgestellt.
- **Anwendungssysteme:** Das Fremdsystem Anwendungssystem bezeichnet die Anwendungssysteme, die in der rechnerunterstützten Produktentwicklung und Fertigungsplanung Einsatz finden. Für den Anwendungskontext werden ausschließlich Anwendungssysteme berücksichtigt, die im Rahmen des Systemverhaltens kommunizieren und Informationen bereitstellen. Nach der Analyse des Stands der Technik und der Forschung umfassen diese Anwendungssysteme die 3D-CAD-, PDM- und FDM-Systeme sowie die CAPP-Systeme als alleinstehende Softwarelösung oder als integrierte Lösung in ERP-Systemen. Da in der werkstückgetriebenen Fertigung die Steuerung der Fertigung statt von MES durch Werkstücke als Informationsträger übernommen wird (vgl. Kapitel 2.1.2), werden MES in der

3 Anforderungsprofil

vorliegenden Dissertation für Anwendungssysteme nicht weiter berücksichtigt.

- **Werkzeugmaschine zur spanenden Fertigung:** Das Fremdsystem Werkzeugmaschine beinhaltet nur Fertigungsressourcen für Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmten Schneiden [39, 40]. Dies beinhaltet beispielsweise Werkzeugmaschinen zum Drehen, Bohren, Senken, Fräsen und Sägen [39].

Im Kontext des Anwendungsfalls sind diese Werkzeugmaschinen durch die Verschmelzung mit internetbasierten Informations- und Kommunikationstechnologien fähig, Informationen zu erfassen und zu verarbeiten sowie über Kommunikationsschnittstellen mit ihrer Fertigungsumgebung zu kommunizieren.

3.2.2 Systemgrenzen

Die Systemgrenzen des Untersuchungsgegenstands der vorliegenden Dissertation beziehen die durchgängige Informationsverarbeitung von der virtuellen Produktentwicklung über die rechnerunterstützte Fertigungsplanung bis zur werkstückgetriebenen Fertigung mit ein. Das Gesamtsystem umfasst dabei ausschließlich die informationstechnischen Methoden und Werkzeuge zur virtuellen Produktentstehung.

Über die Systemgrenzen werden Informationen durch formalisierte Datenstrukturen und Ereignisse über definierte Schnittstellen transportiert.

3.2.3 Systemverhalten

Als Hauptanwendungsfall ist die Steuerung der werkstückindividuellen Fertigungsprozesse durch die Werkstücke als Informationsträger identifiziert worden.

Der Hauptanwendungsfall gliedert sich in acht untergeordnete Anwendungsfälle auf. Abbildung 3.1 stellt die identifizierten Anwendungsfälle im mittleren Abschnitt dar.

Werkstücke als Informationsträger steuern in der Vision der werkstückgetriebenen Fertigung ihre individuellen Fertigungsprozesse. Im vorliegenden Anwendungsfall stellen sie dazu dem Werker Informationen bereit, die als Entscheidungsgrundlage für die Steuerung der werkstückindividuellen Fertigung dienen. (Informationen zur Steuerung der individuellen Fertigung bereitstellen). Die Schritte gliedern sich zum einen in die Entscheidungsfindung durch den Vergleich von geplanten und physisch realisierten Fertigungszuständen und zum anderen in die Kommunikation der aus dem Vergleich resultierenden Prozessparameter und -reihenfolge an die Fertigungsumgebung.

Für die Entscheidungsfindung müssen die werkstückindividuellen Informationen in der Fertigung durch Messmittel erfasst und in eine digitale Repräsentation transformiert werden (Werkstückindividuelle Informationen persistieren). Die Informationen müssen dann in den Merkmalen eines werkstückindividuellen Fertigungszustands persistiert werden. Die so erfassten Merkmale können anschließend in Bezug zu Merkmalen in den geplanten Fertigungszuständen gesetzt werden. Da die Daten zu diesen geplanten Fertigungszuständen jedoch in verteilten Datenbeständen der verschiedenen Anwendungssysteme persistiert sind, müssen die geplanten Fertigungszustände vorab aus den Fertigungsunterlagen und Prozessdaten aggregiert werden (Fertigungsunterlagen und Prozessdaten aggregieren). Erst dann kann das Werkstück als Informationsträger die realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszuständen im Kontext der geplanten Fertigungszustände auswerten.

Durch die Auswertung können werkstückindividuelle Fertigungszustände aus den vorangegangenen Fertigungsvorgängen im Hinblick auf geplante Merkmale und die geometrische Gestalt des Werkstücks ausgewertet werden (Fertigungszustände vergleichen). Das Werkstück als Informationsträ-

3 Anforderungsprofil

gern kann durch den Vergleich Entscheidungen für die Steuerung nachgelagerten Fertigungsvorgänge treffen. Das Werkstück kommuniziert dazu werkstückindividuell Prozessparameter und die Bearbeitungsreihenfolge an seine Fertigungsumgebung (Prozessparameter und -reihenfolge kommunizieren), mit dem Ziel die werkstückindividuellen Herstellungsprozesse optimal an die Vorgaben aus den geplanten Fertigungszuständen anzupassen. Das Werkstück treibt seine Fertigung.

Voraussetzung für die Aggregation der Fertigungsunterlagen ist die Modellierung des 3D-Produktmodells und der Ableitung geplanter Fertigungszustände.

Der Produktentwickler transformiert dazu das Produktmodell in die informationstechnische Darstellung des Produkts, das 3D-Produktmodell (Produktmodell modellieren). Für den Kontext des Anwendungsfalls beinhaltet dies insbesondere die Definition von Produktmerkmalen zur Beschreibung des Materials, die Gestaltung der geometrischen und topologischen Struktur des 3D-Volumenmodells sowie die Spezifikation der Materialoberflächen (Produktmerkmale und -gestalt modellieren). Die Ergebnisse der Modellierung werden im 3D-Produktmodell formal abgebildet und im Produktdatenmodell informationstechnisch persistiert. Das 3D-Produktmodell wird anschließend für die weitere Verarbeitung in nachgelagerten Prozessen freigegeben.

Der Fertigungsplaner erstellt anschließend den Ablaufarbeitsplan (Ablaufarbeitsplan erstellen). Er legt die Arbeitsvorgänge, -parameter und -reihenfolge fest. Der Fertigungsplaner greift dazu auf Wissen über vorangegangene Produktentstehungsprozesse sowie auf Auftrags-, Produkt- und Ressourceninformationen aus dem Herstellungsprozess zu. Im Ablaufarbeitsplan werden auf Basis des freigegebenen 3D-Produktmodells die diskreten Fertigungszustände definiert, die das Werkstück nach jedem Arbeitsvorgang einnehmen soll (Fertigungszustände planen). Der Fertigungsplaner legt dabei auch die

erforderlichen Datenstrukturen zur Beschreibung des realisierten, werkstück-individuellen Fertigungszustands an. Dazu gehören Datenfelder, deren Initialwert sowie die gültige Datenformate. Der Ablaufarbeitsplan wird anschließend für die Fertigung freigegeben.

Die Anforderungen aus der Analyse der Anwendungsfälle werden im nachfolgenden Kapitel hergeleitet und definiert.

3.3 Anforderungen

Aus der Analyse der Anwendungsfälle ergeben sich Anforderungen an die informationstechnischen Methoden und Strukturen zur Ausprägung werkstück-individueller Fertigungszustände. Sie haben die Sicherstellung der informationstechnischen Durchgängigkeit von der virtuellen Produktentwicklung in die werkstückgetriebene Fertigung zum Ziel. Die weiteren Anforderungen an die formale Spezifikation der für die Modellierung erforderlichen Datenstrukturen und an die Vernetzung geplanter und realisierter, werkstückindividueller Fertigungszustände werden nachfolgend erörtert.

3.3.1 Anforderungen an die Methode

Für die Verknüpfung von geplanten und realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszuständen muss eine Methode entwickelt werden, die die Vorgehensweise zur durchgängigen Modellierung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen vom 3D-Produktmodell über den Ablaufarbeitsplan bis in die werkstückgetriebene Fertigung spezifiziert. Die Anforderungen an die Methode werden nachfolgend vorgestellt.

Anforderung 1:

Die Methode muss eine Vorgehensweise definieren, anhand dieser der Produktentwickler die zur Ausprägung von werkstückindividuellen Fertigungs-

3 Anforderungsprofil

zuständen erforderlichen geometrischen und nicht-geometrischen Merkmale im 3D-Produktmodell kennzeichnet.

Die Definition der Datenstruktur für die Beschreibung werkstückindividueller Fertigungszustände beginnt mit der Modellierung der Produktgestalt sowie nicht-geometrischer Produktdaten (vgl. Kapitel 2.2.1). Es bedarf daher einer Vorgehensweise zur Kennzeichnung von Merkmalen im 3D-Produktmodell, die die Datenstruktur und deren Referenzwerte für die spätere Verwendung in den Informationsprozessen zur Ausprägung der werkstückindividuellen Fertigungszustände festlegen. Da mit der Produktfreigabe die Definition des 3D-Produktmodells beendet ist (vgl. Kapitel 3.2.3), muss diese Kennzeichnung bereits während der rechnerunterstützten Produktentwicklung erfolgen.

Im Rahmen des Testfalls 1 muss für die Überprüfung der Tragfähigkeit des Konzepts die entwickelte Methode geometrische und nicht-geometrische Merkmale in der freigegebenen formalen Abbildung des 3D-Produktmodells spezifizieren, die in den nachgelagerten Informationsprozessen der werkstückgetriebenen Fertigung die Datenstruktur und deren Referenzwerte für werkstückindividuelle Fertigungszustände vorgeben.

Anforderung 2:

Die Methode muss eine Vorgehensweise definieren, anhand dieser der Fertigungsplaner die im 3D-Produktmodell gezeichneten Merkmale identifiziert.

Anforderung 3:

Die Methode muss eine Vorgehensweise definieren, anhand dieser der Fertigungsplaner im Ablaufarbeitsplan die identifizierten Merkmale genau einem Arbeitsvorgang zuordnet.

Während der rechnerunterstützten Fertigungsplanung müssen die gekennzeichneten Merkmale aus dem freigegebenen 3D-Produktmodell mit dem Ablaufarbeitsplan verknüpft werden. Der Ablaufarbeitsplan unterscheidet dabei diskrete Arbeitsvorgänge (vgl. Kapitel 3.2.1). Alle gekennzeichneten Merkmale müssen

daher für die Verknüpfung im 3D-Produktmodell identifiziert und informationstechnisch mit den einzelnen Arbeitsvorgängen in Bezug gesetzt werden. Das Ergebnis dieser Zuordnung ist ein Ablaufarbeitsplan mit den geplanten Fertigungszuständen.

Im Rahmen der Testfälle 2 und 3 muss für die Überprüfung der Tragfähigkeit des Konzepts die Methode zum einen die Identifizierung von gekennzeichneten Merkmalen im 3D-Produktmodell gewährleisten und zum anderen die eindeutige Zuordnung der identifizierten Merkmale zu genau einem Arbeitsvorgang sicherstellen. Über dieses Referenzmerkmal können der geplante Fertigungszustand in der werkstückgetriebenen Fertigung mit den realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszuständen assoziiert werden.

Anforderung 4:

Die Methode muss eine Vorgehensweise definieren, anhand dieser das Werkstück als Informationsträger jede werkstückindividuelle Information zur Beschreibung der Werkstückeigenschaften und -gestalt eindeutig informationstechnisch erfasst.

Anforderung 5:

Die Methode muss eine Vorgehensweise definieren, anhand dieser das Werkstück als Informationsträger jede erfasste, werkstückindividuelle Information genau einem Referenzmerkmal eines geplanten Fertigungszustands zuordnet.

Anforderung 6:

Die Methode muss eine Vorgehensweise definieren, anhand dieser das Werkstück als Informationsträger jede erfasste, werkstückindividuelle Information mit genau einem Referenzwert aus dem geplanten Fertigungszustands informationstechnisch vergleicht.

Während der Fertigung des einzelnen Werkstücks werden quantitative und qualitative Werkstückinformationen insbesondere Informationen zur Gestalt des Werkstücks erfasst (vgl. Kapitel 3.2.3). Diese Informationen müssen transformiert

3 Anforderungsprofil

sowie dem Werkstück eindeutig zugeordnet und informationstechnisch zugänglich gemacht werden. Die erfassten, werkstückindividuellen Informationen sind dabei Bestandteil der aus dem geplanten Fertigungszustand abgeleiteten Datenstrukturen. Daher muss die werkstückindividuelle Information über das Werkstückmerkmal genau einem Referenzmerkmal eines geplanten Fertigungszustands zugeordnet werden. Falls der informationstechnische Zugriff gegeben ist, erlaubt die eindeutige Zuordnung dann den informationstechnischen Vergleich von geplanten und realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszuständen.

Im Rahmen des Testfalls 6 muss für die Überprüfung der Tragfähigkeit des Konzepts die Methode eine Vorgehensweise für die semantische Repräsentation von werkstückindividuellen Informationen in den Merkmalen von realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszuständen sicherstellen. Im Rahmen der Testfälle 5 und 6 muss für die Überprüfung der Tragfähigkeit des Konzepts die Methode zum einen eine Vorgehensweise für die eindeutige Zuordnung der werkstückindividuellen Informationen zu den Referenzmerkmalen vorstellen und zum anderen den informationstechnischen Vergleich zwischen den Merkmalen eines geplanten und eines realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszustands sicherstellen.

Anforderung 7:

Die Methode muss eine Vorgehensweise definieren, anhand dieser das Werkstück als Informationsträger bei der Abweichung von einem geplanten Fertigungszustand genau ein während der Produktentwicklung geplantes Verhalten informationstechnisch verarbeitet.

Anforderung 8:

Die Methode muss eine Vorgehensweise definieren, anhand dieser das Werkstück als Informationsträger bei der Abweichung von einem geplanten Fertigungszustand genau ein während der Produktentwicklung geplantes Verhalten auslöst.

Falls der Vergleich der geplanten und realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszustände Handlungsbedarf für die Steuerung der individuellen Fertigungsprozesse aufzeigt (vgl. Kapitel 3.2.3), benötigt das Werkstück Entscheidungslogiken. Für jedes Merkmal des geplanten Fertigungszustands müssen dazu eigene Entscheidungslogiken implementiert werden, die die Abweichungsfälle berücksichtigen. Diese Entscheidungslogiken müssen vom Werkstück als Verhalten informationstechnisch auswertbar sein. Die Modellierung des Verhaltens erfolgt während der Produktentwicklung und muss im 3D-Produktmodell abgebildet werden.

Im Rahmen der Testfälle 7 und 8 muss für die Überprüfung der Tragfähigkeit des Konzepts die Methode die Modellierung von Werkstückverhalten im 3D-Produktmodell sicherstellen, welches informationstechnisch vom Werkstück während der werkstückgetriebenen Fertigung verarbeitet und bei Bedarf ausgelöst wird.

3.3.2 Anforderungen an das Informationsmodell

Der Methode liegt die formale Spezifikation der Datenstrukturen zur Verknüpfung von geplanten und realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszuständen in Form einer digitalen Repräsentation eines Werkstückinformationsmodells zugrunde. Die Anforderungen an die digitale Repräsentation dieser Datenstrukturen werden nachfolgend vorgestellt.

Anforderung 9:

Das Informationsmodell muss die Daten- und Beziehungsstrukturen für die Beschreibung von geplanten und realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszuständen objektorientiert formal abbilden.

Anforderung 10:

Das Informationsmodell muss die Beziehungsstrukturen für den Vergleich

3 Anforderungsprofil

von geplanten und realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszuständen über den Herstellungsprozess semantisch verarbeitbar abbilden.

Anforderung 11:

Das Informationsmodell muss für den algorithmisierten Vergleich von geplanten und realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszuständen ein Schema spezifizieren.

Die Modellierung werkstückindividueller Fertigungszustände bedarf der Überführung der physischen Fertigungszustände in ein objektorientiertes Modell und dessen formale Abbildung in der Spezifikation der Datenstrukturen. Die Spezifikation der Datenstrukturen muss die im Modell definierten Informationen objektorientiert formal abbilden. Dazu zählen die Klassenstrukturen, Attribute, Methoden und Beziehungen der Elemente untereinander. Die informationstechnische Verarbeitbarkeit der Spezifikation muss dabei im Sinne einer durchgängigen Informationsverarbeitung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen sichergestellt werden. Das Informationsmodell liefert dazu die entsprechenden Schemata, um die in der Produktdefinition geplanten Fertigungszustände in die werkstückindividuellen Fertigungszustände zu überführen. Bestandteile des Informationsmodells bilden daher Datenstrukturen aus dem integrierten Produktdatenmodell, dem Repräsentation des Ablaufarbeitsplans sowie Datenstrukturen zur Beschreibung des einzelnen Werkstücks.

Im Rahmen der Testfälle 9, 10 und 11 muss für die Überprüfung der Tragfähigkeit des Konzepts das Informationsmodell die Datenstrukturen für geplante und realisierte, werkstückindividuelle Fertigungszustände objektorientiert formal und semantisch abbilden. Der informationstechnische Vergleich beider Datenstrukturen, also der Repräsentation des Produktmodells und des Werkstückmodells, muss algorithmisiert, informationstechnisch durch ein in Informationsmodell spezifizierten Schema verarbeitbar sein.

Anforderung 12:

Das Informationsmodell muss entlang des Werkstückentstehungsprozesses durch Partialmodelle mittels Beziehungsstrukturen logisch erweiterbar sein.

Die werkstückindividuellen Informationen werden zeitlich versetzt während der Werkstückentstehung erfasst. Zum Zeitpunkt der Instanziierung des Informationsmodells sind nicht alle Informationen persistiert. Individuelle Werkstückinformationen werden in separaten Partialmodellen erfasst. Sie müssen trotzdem zu einem nachgelagerten Zeitpunkt logisch durch verknüpfende Beziehungsstrukturen in das gesamte Informationsmodell integriert werden, so dass zu jedem Zeitpunkt ein kohärentes Informationsmodell zur Beschreibung des Fertigungszustands besteht. Insbesondere Beziehungen zwischen einzelnen Datenstrukturen zur Beschreibung eines werkstückindividuellen Fertigungszustands und der Beschreibung des geplanten Fertigungszustands im Produktdatenmodell müssen im Informationsmodell eindeutig assoziierbar sein.

Im Rahmen des Testfalls 12 muss für die Überprüfung der Tragfähigkeit des Konzepts das Informationsmodell über die Werkstückentstehung durch ergänzende Partialmodelle modular und logisch erweiterbar sein.

***Anforderung 13:** Das Informationsmodell muss die Daten- und Beziehungsstrukturen zur Versionierung von einzelnen Kern- und Partialmodellen spezifizieren.*

Die sequentielle Zuweisung von Informationen während der Werkstückfertigung erfordert die Spezifikation von Datenstrukturen für die Versionierung einzelner Informationsentitäten und des gesamten Informationsmodells.

Im Rahmen des Testfalls 13 muss für die Überprüfung der Tragfähigkeit des Konzepts das Informationsmodell die Klassen, Attribute und Beziehungsstrukturen für die Versionierung einzelner Informationseinheiten spezifizieren.

Anforderung 14:

Das Informationsmodell muss die Datenstrukturen der Produkt- und Pro-

3 Anforderungsprofil

zessinformationen strukturell mit den werkstückindividuellen Informationen integrieren.

Anforderung 15:

Das Informationsmodell muss die durchgängige Bereitstellung der Informationen in der werkstückgetriebenen Fertigung gewährleisten.

Die semantischen Repräsentationen des 3D-Produktmodells, des Ablaufarbeitsplans und der Werkstücke sind dezentral über verschiedene Anwendungssysteme verteilt (vgl. Kapitel 3.2.1). Für die Integration dieser Datenstrukturen muss das Informationsmodell ein Schema für die Etablierung und Erhaltung der Kohärenz spezifizieren. Für die durchgängige Informationsverarbeitung müssen Architekturansätze erarbeitet werden, die die Informationen ohne Redundanzen in ein Informationsmodell integrieren.

Im Rahmen der Testfälle 14 und 15 muss für die Überprüfung der Tragfähigkeit des Konzepts das Informationsmodell zum einen die Abhängigkeits- und Beziehungsstrukturen für die föderierten Informationseinheiten aus den Kern- und Partialmodellen spezifizieren. Zum anderen muss es durch die Verwendung eines einheitlichen Informationsaustauschformats sicherstellen, dass die föderierten Informationsentitäten über die gesamte Prozesskette der werkstückgetriebenen Fertigung durchgängig verarbeitbar sind.

Anforderung 16:

Das Informationsmodell muss die Daten- und Beziehungsstrukturen für die formale Abbildung von Privilegien beinhalten.

Mit der Föderation der Datenbestände entsteht der Bedarf für ein Informationsrechtmanagement, das die Privilegien zu jeder Informationsentität im Informationsmodell verwaltet. Das Informationsrechtmanagement muss dazu Besitzer, Ersteller und Benutzer sowie Benutzergruppen einzelner Datenstrukturen spezifizieren und diese mit den Privilegien in Verbindung setzen.

Im Rahmen des Testfalls 16 muss für die Überprüfung der Tragfähigkeit des Konzepts das Informationsmodell die Klassen, Attribute und Beziehungsstrukturen für die Abbildung der Privilegien formal spezifizieren und das Informationsrechtemanagement sicherstellen.

3.3.3 Anforderungen an das Assistenzsystem

Für die Unterstützung der werkstückgetriebenen Fertigung auf Grundlage werkstückindividueller Fertigungszustände muss das Konzept durch die prototypische Implementierung eines Assistenzsystem in die Informationsprozesse der werkstückgetriebenen Fertigung integriert werden. Die Anforderungen an das Assistenzsystem werden nachfolgend vorgestellt.

Anforderung 17:

Das Assistenzsystem muss die durchgängige Erstellung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen in den Werkzeugen der virtuellen Produktentstehung unterstützen.

Anforderung 18:

Das Assistenzsystem sollte eine Schnittstelle für die Integration in die domänenspezifische Anwendungssoftware bereitstellen.

Das Assistenzsystem muss die durchgängige Modellierung der werkstückindividuellen Fertigungszustände für die virtuelle Produktentwicklung und die rechnerunterstützte Fertigungsplanung sicherstellen. Bestandteile sind zum einen die Kennzeichnung der Merkmale im 3D-Produktmodell, die Modellierung der geplanten Fertigungszustände sowie zum anderen die Zuweisung von werkstückindividuellen Informationen und die Rückverfolgung vorangegangener Entstehungsprozesse. Das Assistenzsystem stellt dazu die Benutzungsschnittstelle für die Produktentwickler und Fertigungsplaner zur Verfügung. Die Benutzungsschnittstelle sollte dabei in bestehende domänenspezifische Anwendungssoftware über bestehende Schnittstellen integrierbar sein.

3 Anforderungsprofil

Im Rahmen der Testfälle 17 und 18 muss für die Überprüfung der Tragfähigkeit des Konzepts das Assistenzsystem für die Modellierung und Visualisierung der werkstückindividuellen Fertigungszustände eine Benutzungsschnittstelle für Entwicklungs- und Planungsphasen der virtuellen Produktentstehung bereitstellen, die die realisierten Fertigungszustände mit Bezug zur Produktdefinition werkstückindividuell präsentieren. Das Assistenzsystem sollte dabei über bestehende Schnittstellen in die in Kapitel 3.2.1 identifizierte Anwendungssoftware integriert werden.

Anforderung 19:

Das Assistenzsystem muss die Präsentation von im integrierten Werkstückinformationsmodell abgebildeten, werkstückindividuellen Fertigungszuständen im Bezug zu geplanten Fertigungszuständen unterstützen.

Das Assistenzsystem muss die Repräsentation des integrierten Werkstückinformationsmodells in eine menschenlesbare Präsentation überführen. Realisierte, werkstückindividuelle Fertigungszustände müssen dabei in Bezug zu dem jeweiligen geplanten Fertigungszustand gesetzt und algorithmisiert verglichen werden.

Im Rahmen des Testfalls 19 muss für die Überprüfung der Tragfähigkeit des Konzepts das Assistenzsystem dazu innerhalb der Benutzungsschnittstelle eine Visualisierung des integrierten Werkstückinformationsmodells bereitstellen, dass die einzelnen Informationen jedes Werkstückmerkmals sowie deren Vergleich mit dem verknüpften Produktmerkmalen graphisch oder textuell darstellt.

Anforderung 20:

Das Assistenzsystem sollte den Verlauf spezifischer Merkmale von realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszuständen präsentieren.

Anforderung 21:

Das Assistenzsystem sollte den Vergleich spezifischer Merkmale von realisier-

ten, werkstückindividuellen Fertigungszuständen unterschiedlicher Werkstücke präsentieren.

Das Assistenzsystem sollte die Rückverfolgung spezifischer Werkstückmerkmale aus vorangegangenen Werkstückentstehungsprozessen präsentieren. Durch die Analyse der Werkstückmerkmale kann domänenspezifisches Wissen synthetisiert und ein domänenübergreifender Kompetenztransfer etabliert werden.

Im Rahmen der Testfälle 20 und 21 sollte für die Überprüfung der Tragfähigkeit des Konzepts das Assistenzsystem zum einen die Anzeige der Historie spezifischer Werkstückmerkmale sicherstellen und diese zum anderen mit den Merkmalen anderer Werkstücke in Vergleich setzen.

3.4 Fazit

Das Anforderungsprofil setzt sich zusammen aus Anforderungen an die Methode zur Ausprägung werkstückindividueller Fertigungszustände, aus Anforderungen an die zugrundeliegende formale Spezifikation des integrierten Werkstückinformationsmodells und aus Anforderungen an das Assistenzsystem zur prototypischen Integration der Ausprägung werkstückindividueller Fertigungszustände in die virtuelle Produktentstehung von Werkstücken als Informationsträger. Die Tabelle 3.1 fasst die Anforderungen und den jeweiligen Testfall für die Überprüfung der Tragfähigkeit des Konzepts im Rahmen informationstechnischer Unterstützung der werkstückgetriebenen Fertigung zusammen.

Das Anforderungsprofil bildet die Grundlage zur Konzeptentwicklung in Kapitel 4 sowie dessen prototypischen Implementierung durch ein Assistenzsystem in Kapitel 5. Die Testfälle werden in Kapitel 6 zur Überprüfung der Tragfähigkeit des entwickelten Konzepts und der prototypischen Implementierung untersucht.

Tabelle 3.1: Überblick über das Anforderungsprofil

Nr.	Art	Kurzbeschreibung und <i>Testfall</i>
Anforderungen an die Methode		
1	muss	Die Methode muss eine Vorgehensweise definieren, anhand dieser der Produktentwickler die zur Ausprägung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen erforderlichen geometrischen und nicht-geometrischen Merkmale im 3D-Produktmodell kennzeichnet. <i>Kennzeichnung von Merkmalen im 3D-Produktmodell</i>
2	muss	Die Methode muss eine Vorgehensweise definieren, anhand dieser der Fertigungsplaner die im 3D-Produktmodell gezeichneten Merkmale identifiziert. <i>Identifikation von Merkmalen im 3D-Produktmodell</i>
3	muss	Die Methode muss eine Vorgehensweise definieren, anhand dieser der Fertigungsplaner im Ablaufarbeitsplan die identifizierten Merkmale genau einem Arbeitsvorgang zuordnet. <i>1:1-Zuordnung von Merkmalen zu Fertigungsprozessen</i>
4	muss	Die Methode muss eine Vorgehensweise definieren, anhand dieser das Werkstück als Informationsträger jede werkstückindividuelle Information zur Beschreibung der Werkstückeigenschaften und -gestalt eindeutig informationstechnisch erfasst. <i>Abbildung von werkstückindividuellen Informationen</i>
5	muss	Die Methode muss eine Vorgehensweise definieren, anhand dieser das Werkstück als Informationsträger jede erfasste, werkstückindividuelle Information genau einem Referenzmerkmal eines geplanten Fertigungszustands zuordnet.

Fortsetzung auf der nächsten Seite...

Fortsetzung von vorheriger Seite...

Nr.	Art	Kurzbeschreibung und Testfall
		<i>1:1-Zuordnung von werkstückindividuellen Informationen</i>
6	muss	Die Methode muss eine Vorgehensweise definieren, anhand dieser das Werkstück als Informationsträger jede erfasste, werkstückindividuelle Information mit genau einem Referenzwert aus dem geplanten Fertigungszustands informationstechnisch vergleicht. <i>1:1-Vergleich von Fertigungszuständen</i>
7	muss	Die Methode muss eine Vorgehensweise definieren, anhand dieser das Werkstück als Informationsträger bei der Abweichung von einem geplanten Fertigungszustand genau ein während der Produktentwicklung geplantes Verhalten informationstechnisch verarbeitet. <i>Aggregieren des hinterlegten Werkstückverhaltens</i>
8	muss	Die Methode muss eine Vorgehensweise definieren, anhand dieser das Werkstück als Informationsträger bei der Abweichung von einem geplanten Fertigungszustand genau ein während der Produktentwicklung geplantes Verhalten auslöst. <i>Auslösen des hinterlegten Werkstückverhaltens</i>

Anforderungen an das Informationsmodell		
9	muss	Das Informationsmodell muss die Daten- und Beziehungsstrukturen für die Beschreibung von geplanten und realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszuständen objektorientiert formal abbilden. <i>Abbildung der Daten- und Beziehungsstrukturen</i>

Fortsetzung auf der nächsten Seite...

3 Anforderungsprofil

Fortsetzung von vorheriger Seite...

Nr.	Art	Kurzbeschreibung und Testfall
10	muss	<p>Das Informationsmodell muss die Beziehungsstrukturen für den Vergleich von geplanten und realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszuständen über den Herstellungsprozess semantisch verarbeitbar abbilden.</p> <p><i>Semantische Verarbeitung der Beziehungsstrukturen</i></p>
11	muss	<p>Das Informationsmodell muss für den algorithmisierten Vergleich von geplanten und realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszuständen ein Schema spezifizieren.</p> <p><i>Schema für den algorithmisierten Vergleich</i></p>
12	muss	<p>Das Informationsmodell muss entlang des Werkstückentstehungsprozesses durch Partialmodelle mittels Beziehungsstrukturen logisch erweiterbar sein.</p> <p><i>Modulare Erweiterbarkeit um Partialmodelle</i></p>
13	muss	<p>Das Informationsmodell muss die Daten- und Beziehungsstrukturen zur Versionierung von einzelnen Kern- und Partialmodellen spezifizieren.</p> <p><i>Spezifikation zur Versionierung einzelner Datenstrukturen</i></p>
14	muss	<p>Das Informationsmodell muss die Datenstrukturen der Produkt- und Prozessinformationen strukturell mit den werkstückindividuellen Informationen integrieren.</p> <p><i>Verknüpfung der föderierten Datenbestände</i></p>
15	muss	<p>Das Informationsmodell muss die durchgängige Bereitstellung der Informationen in der werkstückgetriebenen Fertigung gewährleisten.</p> <p><i>Verwendung genau eines Kommunikationsformats</i></p>

Fortsetzung auf der nächsten Seite...

Fortsetzung von vorheriger Seite...

Nr.	Art	Kurzbeschreibung und Testfall
16	muss	Das Informationsmodell muss die Daten- und Beziehungsstrukturen für die formale Abbildung von Privilegien beinhalten. <i>Spezifikation von Privilegien für einzelne Datenstrukturen</i>

Anforderungen an das Assistenzsystem		
17	muss	Das Assistenzsystem muss die durchgängige Erstellung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen in den Werkzeugen der virtuellen Produktentstehung unterstützen. <i>Benutzungsschnittstelle über den Produktlebenszyklus</i>
18	sollte	Das Assistenzsystem sollte eine Schnittstelle für die Integration in die domänenspezifische Anwendungssoftware bereitstellen. <i>Schnittstelle für die Integration von Anwendungssoftware</i>
19	muss	Das Assistenzsystem muss die Präsentation von im integrierten Werkstückinformationsmodell abgebildeten, werkstückindividuellen Fertigungszuständen im Bezug zu geplanten Fertigungszuständen unterstützen. <i>Präsentation von einzelnen Werkstückzuständen</i>
20	sollte	Das Assistenzsystem sollte den Verlauf spezifischer Merkmale von realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszuständen präsentieren. <i>Anzeige realisierter Fertigungszustände</i>
21	sollte	Das Assistenzsystem sollte den Vergleich spezifischer Merkmale von realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszuständen unterschiedlicher Werkstücke präsentieren.

Fortsetzung auf der nächsten Seite...

3 Anforderungsprofil

Fortsetzung von vorheriger Seite...

Nr.	Art	Kurzbeschreibung und Testfall
		<i>Anzeige der Verteilung realisierter Fertigungszustände</i>

Legende:

muss = Pflichtanforderung

sollte = Wunschanforderung

4

Konzept

Im vorliegenden Kapitel wird zunächst auf Basis des in Kapitel 2 analysierten Stands der Technik und der Forschung sowie des in Kapitel 3 abgeleiteten Anforderungsprofils ein Konzept für die Modellierung und die Ausprägung werkstückindividueller Fertigungszustände entwickelt. Das Konzept gliedert sich in drei Phasen:

1. die Kennzeichnung von geometrischen und nicht-geometrischen Merkmalen im 3D-Produktmodell zur Beschreibung werkstückindividueller Fertigungszustände,
2. die Ableitung dieser Referenzmerkmale und deren Zuordnung zu diskreten Arbeitsvorgängen im Ablaufarbeitsplan sowie
3. die Ausprägung werkstückindividueller Fertigungszustände durch Zuweisung und Auswertung erfasster Werkstückmerkmale.

Für jede Phase werden der Methodenbaustein sowie die Kern- und Partialmodelle des integrierten Werkstückinformationsmodells vorgestellt. Die Spezifikation ergänzender Kern- und Partialmodelle schließt sich an.

4.1 Übersicht über das Gesamtkonzept

Der Fokus des Konzepts liegt in der durchgängigen Informationsbereitstellung und -verarbeitung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen. Die Lücke zwischen modellierten und physisch realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszuständen soll geschlossen werden. Die im 3D-Produktmodell gekennzeichneten Merkmale des Produkts sollen dazu durch die durchgängige

4 Konzept

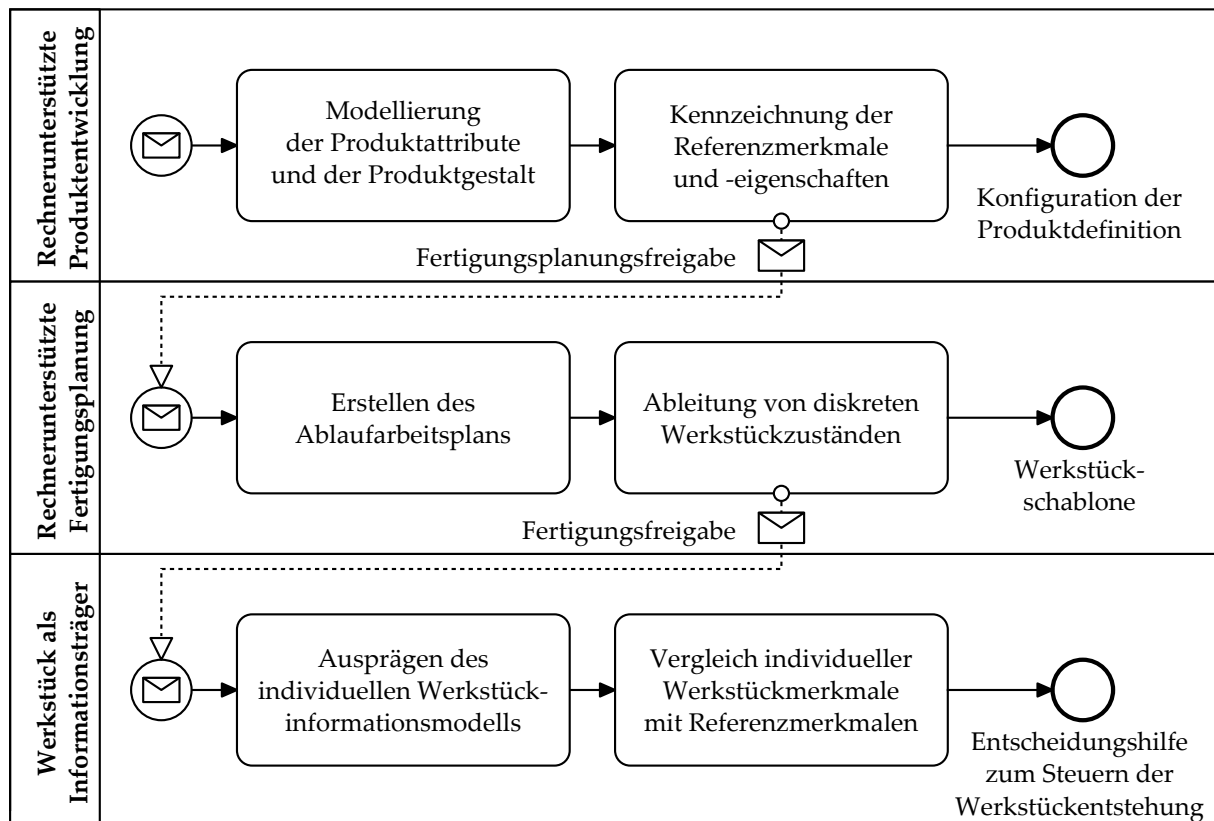


Abbildung 4.1: Überblick über das Gesamtkonzept in BPMN

Verwendung eines integrierten Werkstückinformationsmodells der nachgelagerten werkstückgetriebenen Fertigung informationstechnisch bereitgestellt werden. Abbildung 4.1 gibt einen Überblick über das Gesamtkonzept als Business Process Model and Notation (BPMN)¹. Die drei einzelnen Phasen des Gesamtkonzepts werden nachfolgend erläutert.

In der ersten Phase wird das 3D-Produktmodell durch den Produktentwickler in der rechnerunterstützten Produktentwicklung modelliert. Ergebnis der Modellierung ist die formale Abbildung des Produktmodells. Das Produktinformationsmodell spezifiziert dazu die für das Konzept abgebildeten Datenstrukturen des Produktmodells zur Beschreibung der geometrischen Gestalt, zur Beschreibung

¹ Weitere Informationen zur Business Process Model and Notation finden sich unter anderem in [54].

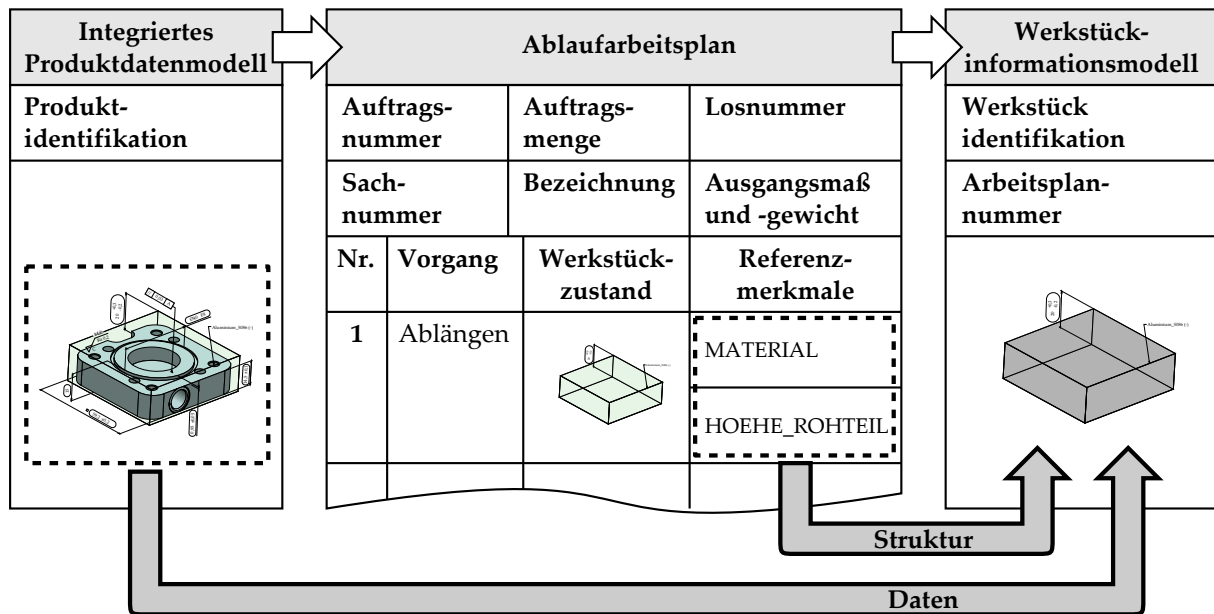


Abbildung 4.2: Beispielhafte Darstellung der Vorgehensweise anhand eines Werkstücks

nicht-geometrischer Produktdefinitionsdaten und zur Beschreibung des Verhaltens der zu fertigenden Werkstücke (vgl. Abbildung 4.2 auf der linken Seite). Diese Datenstrukturen werden im Produktinformationsmodell über semantische Annotationen gekennzeichnet und den nachfolgenden Informationsprozessen bereitgestellt. Mit der Fertigungsplanungsfreigabe werden die Daten des Produktinformationsmodells als verbindlicher Datensatz zur Beschreibung der zu fertigenden Werkstücke festgelegt.

Während der zweiten Phase wird durch den Fertigungsplaner auf Basis des Prozessinformationsmodells der Ablaufarbeitsplan festgelegt. Ergebnis ist die formale Abbildung des erstellten Ablaufarbeitsplans in das Prozessinformationsmodell. Das Prozessinformationsmodell spezifiziert die diskreten Arbeitsvorgänge (AV) und deren Bearbeitungsreihenfolge. Durch die Ableitung der im 3D-Produktmodell gekennzeichneten Merkmale und Eigenschaften werden Referenzmerkmale für die formale Beschreibung von einzelnen Werkstücken definiert. Die Zuordnung dieser Referenzmerkmale zu den AV des Ablaufarbeitsplans führt zur Modellierung von geplanten Fertigungszuständen (vgl.

4 Konzept

Abbildung 4.2 in der Mitte). Die Zusammenfassung der geplanten Fertigungszustände und deren Freigabe im Rahmen der Fertigungsfreigabe spezifiziert den verbindlichen Datensatz zur Beschreibung der Fertigungsunterlagen sowie die generische Datenstruktur zur Ausprägung werkstückindividueller Fertigungszustände. In der vorliegenden Dissertation wird dieser Datensatz Werkstückschablone genannt.

Die dritte Phase bildet die physische Fertigung einzelner Werkstücke in der werkstückgetriebenen Fertigung. Jedes Werkstück wird durch ein individuelles, digitales Abbild repräsentiert, dem instanziierten Werkstückinformationsmodell. Individuelle Informationen zu Merkmalen und zur geometrischen Gestalt des Werkstücks werden vom Werkstück während seines Herstellungsprozesses seinem individuellen Werkstückinformationsmodell zugewiesen. Die Werkstückschablone gibt dabei über Referenzmerkmale die erforderlichen Datenstrukturen für die vollständige Beschreibung der einzelnen Werkstückmerkmale eines werkstückindividuellen Fertigungszustands vor (vgl. Abbildung 4.2 auf der rechten Seite). Die anschließende semantische Auswertung des integrierten Werkstückinformationsmodells im Kontext der Werkstückschablone kann das Werkstück als Informationsträger als Entscheidungsgrundlage für die Steuerung seiner individuellen Fertigung in der werkstückgetriebenen Fertigung dienen.

Das integrierte Werkstückinformationsmodell ist die digitale Repräsentation des Werkstücks. Es verknüpft die Datenstrukturen dieser Repräsentation mit den Datenstrukturen aus der Repräsentation der geplanten Fertigungszustände, die in der Produktrepräsentation im integrierten Produktdatenmodell und dem dazu gehörigen Ablaufarbeitsplan spezifiziert werden. Das integrierte Werkstückinformationsmodell zielt damit im Gegensatz zum integrierten Produktdatenmodell der ISO-Norm 10303 nicht darauf möglichst alle Produktdaten über den gesamten Produktlebenszyklus in mehreren Partialmodellen abzudecken, sondern auf die Abbildung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen. Abbildung 4.3 gibt einen Überblick über die Struktur des integrierten Werkstückinformationsmodells. Abbildung 4.9 auf Seite 109 bis Abbildung 4.11 auf

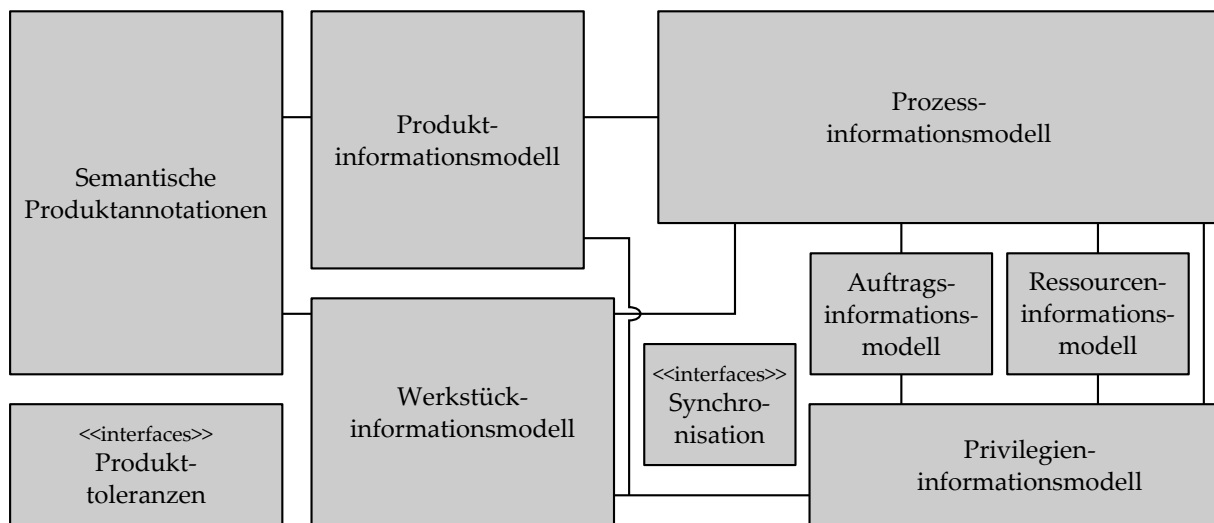


Abbildung 4.3: Überblick über das integrierte Werkstückinformationsmodell

Seite 111 stellen die Kern- und Partialmodelle der semantischen Repräsentation des Werkstückinformationsmodells detaillierter als Klassendiagramm nach Notation der Unified Modeling Language (UML)² dar. Die Abbildungen verbergen im Sinne der Übersichtlichkeit die Signaturen der einzelnen Attribute und der Methoden jeder Klasse. Die Kern- und Partialmodelle sind im Einzelnen:

- das *Werkstückinformationsmodell* für die Repräsentation des Werkstückmodells,
- das *Produktinformationsmodell* für die Repräsentation des Produktmodells,
- die Informationsmodelle zu *semantischen Produktannotationen* und zu *Produkttoleranzen*,
- das *Prozessinformationsmodell* für die Repräsentation des Ablaufarbeitsplans,
- das Informationsmodell für die Repräsentation der *Synchronisationsschnittstellen*,

² Weitere Informationen zu Klassendiagrammen in der Unified Modeling Language finden sich unter anderem in [21, 55, 99, 98, 118, 146].

4 Konzept

- das *Auftragsinformationsmodell* als Schnittstelle zur Anbindung der Auftragsplanung,
- das *Ressourceninformationsmodell* als Schnittstelle für die Ressourcenplanung sowie
- das *Privilegieninformationsmodell* für die Repräsentation der Benutzerprivilegien.

Die nachfolgenden Kapitel 4.2 bis Kapitel 4.5 beschreiben die Kern- und Partialmodelle im Kontext der Phasen des Gesamtkonzepts (vgl. Abbildung 4.1).

4.2 Kennzeichnung von Werkstückmerkmalen und -eigenschaften

Für die informationstechnisch durchgängige Verarbeitung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen müssen die Werkstückzustände im Werkstückinformationsmodell rechnerintern abgebildet werden [15]. Nach den Methoden der Modellbildung wird dafür ein Modell für werkstückindividuelle Fertigungszustände gebildet, abstrahiert und verkürzt [123]. Die notwendige Vorgehensweise und die Datenstrukturen des erforderlichen Werkstück- und Produktinformationsmodells werden im nachfolgenden Kapitel definiert.

4.2.1 Modellierung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen

Für die durchgängige, informationstechnische Verarbeitung müssen die werkstückindividuellen Fertigungszustände in das Werkstückinformationsmodell überführt werden. Das Werkstückinformationsmodell ist eine abstrahierte Abbildung [123]. Es bildet ein individuelles Werkstück während seines Herstellungsprozesses ab. Ein Modell ist nach STACHOWIAK charakterisiert durch das

4.2 Kennzeichnung von Werkstückmerkmalen und -eigenschaften

Abbildungsmerkmal, das Verkürzungsmerkmal, das pragmatische Merkmal und durch das Merkmal der Idealisierung [123].

Ausgehend von der Analyse des Stands der Technik und der Forschung zur virtuellen Produktentstehung (vgl. Kapitel 2.1.3) und zur technischen Produktdokumentation (vgl. Kapitel 2.2.1) sowie in Anlehnung an DIN 8580 [39] wird das Werkstückinformationsmodell eines einzelnen Werkstückes in der werkstückgetriebenen Fertigung auf die nachfolgenden Basismerkmale reduziert:

- die *eindeutige Identifikation (ID)*, die bei der Fertigung festgelegt wird,
- die *geometrische Gestalt*, die aus der schrittweisen Änderung der Form durch die spanende Fertigung resultiert,
- die *Materialeigenschaften*, die die materiellen Stoffeigenschaften des Werkstücks charakterisieren,
- die *Materialoberfläche* als Resultat des mechanischen Abtrennens von Werkstückschichten durch die spanende Bearbeitung mit geometrisch bestimmten Schneiden (vgl. [40]) und
- das *Werkstückverhalten*, welches das Verhalten eines Werkstücks bei ungeplanten Fertigungszuständen beschreibt.

Die Fertigungsunterlagen bestehend aus dem 3D-Produktmodell inklusive semantischer Produktannotationen und dem Ablaufarbeitsplan (vgl. Kapitel 3.2.1) stellen den verbindlichen Datensatz für die Fertigung von Werkstücken dar. Die Repräsentation des integrierten Werkstückinformationsmodells leitet sich daher informationstechnisch aus dieser Repräsentation ab. Das nachfolgende Kapitel spezifiziert dieses integrierte Werkstückinformationsmodell.

4.2.2 Produkt- und Werkstückinformationsmodell

Für die durchgängige Beschreibung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen von der Produktentwicklung bis zur werkstückgetriebenen Fertigung müssen die Datenstrukturen des 3D-Produktmodells in die semantische Repräsentation des Werkstückinformationsmodells überführt werden. Zwischen Produkt- und Werkstückinformationsmodell besteht dabei ein Abhängigkeitsverhältnis. Das Abhängigkeitsverhältnis und die Datenstrukturen werden in der nachfolgenden Spezifikation vorgestellt.

Werkstückinformationsmodell

Das Kernmodell zur Repräsentation von Werkstückinformationen spezifiziert die Beschreibung der Datenstrukturen des Werkstückinformationsmodells. Das Partialmodell ist in der Abbildung 4.10 auf Seite 110 im unteren Abschnitt dargestellt.

Zu den für den vorliegenden Kontext (vgl. Kapitel 4.2.1) identifizierten Basismerkmalen des Werkstückinformationsmodells (`WerkstückMerkmalDefinition`³) gehören die Merkmale zur Zuordnung des Materials (`MaterialMerkmal`), zur Beschreibung der Gestalt (`GestaltMerkmal`), technologische Merkmale (`TechnologieMerkmal`) und die Merkmale zur Definition des Werkstückverhaltens. Da das Verhalten werkstückindividuell ist, ist das Werkstückverhalten im Werkstückinformationsmodell parametrisch polymorph⁴ in Abhängigkeit der Identifikation ausgeprägt.

³ Texte in Schreibmaschinenschrift referenzieren innerhalb des vorliegenden Kapitels Klassen, Attribute, Methoden und Objekte in den zugeordneten Abbildungen.

⁴ Parametrisch polymorphe Methoden sind Bestandteile von parametrischen Klassen. Parametrische Klassen werden auch Schablonen, Klassenvorlagen oder generische Klassen genannt [99]. Eine parametrische Klasse ist eine Klasse, bei der Teile der Spezifikation durch Parameter definiert sind und erst bei der Instanziierung festgelegt werden [99].

4.2 Kennzeichnung von Werkstückmerkmalen und -eigenschaften

Anwendungsbezogene Werkstückmerkmale integriert das Werkstückinformationsmodell über weitere Partialmodelle. Sie spezifizieren die Datenstrukturen für die jeweiligen Werkstückmerkmalsdefinitionen. Für die semantische Auswertung dieser Werkstückmerkmale müssen die erfassten Werkstückmerkmalsdefinitionen in die vorgestellten Basismerkmale transformiert werden. Abbildung 4.10 auf Seite 110 stellt die anwendungsbezogenen Partialmodelle nicht dar.

Der Werkstückzustand aggregiert sowohl die Basis- als auch die anwendungsbezogenen Werkstückmerkmalsdefinitionen. Alle Werkstückzustände sind Bestandteil der Werkstückschablone.

Das Werkstückinformationsmodell spezifiziert darüber hinaus noch weitere Datenstrukturen, die für das Konzept zwar nicht erforderlich, jedoch für die Umsetzung der prototypischen Implementierung in Kapitel 5 von Bedeutung sind. Dazu zählen die Spezifikation der räumlichen Lokalisierung von Werkstücken, die Definition des Verwendungsnachweises über die Baugruppenstruktur, die Präsentation der Werkstückmerkmalsdefinitionen (`WerkstückPräsentation`) und der Werkstücklebenszyklusstatus (`WerkstückLebensZyklusStatusEnum`), der in Anlehnung an den Produktlebenszyklusstatus den Status der Werkstückdaten spezifiziert.

Andere Merkmale des Systems werden in der Modellbildung nach STACHOWIAK bewusst vernachlässigt [123]. Sie sind im vorliegenden Kontext für die Ausprägung werkstückindividueller Fertigungszustände nicht erforderlich.

Produktinformationsmodell

Das Kernmodell zur Repräsentation von Produktinformationen spezifiziert die Beschreibung der für die Ausprägung werkstückindividueller Fertigungszustände verwendeten Datenstrukturen des 3D-Produktmodells. Das Partialmodell ist in der Abbildung 4.10 auf Seite 110 im oberen Abschnitt dargestellt.

4 Konzept

Die Spezifikation des Produktinformationsmodells lehnt sich an den STEP Part 214 für die Repräsentation und den Austausch von Produktdaten an (vgl. Kapitel 2.2.1). Es erweitert die Produktrepräsentation um Produktzustände und Synchronisationsschnittstellen (vgl. Kapitel 4.3.3).

Während der Modellierung wird das 3D-Produktmodell in der Produktdefinition abgebildet. Bei der Freigabe der Fertigungsplanung wird eine spezifische Version (`ProduktDatenVersion`) des 3D-Produktmodells der Konfiguration des Produkts zugeordnet und gegen weitere Änderungen gesperrt. Jede Produktdatenversion spezifiziert den Zustand eines Produkts zu einem geplanten Fertigungsprozesszeitpunkt (`ProduktZustand`). Die einzelnen Produktzustände beschreiben die Produktattribute, die topologisch-geometrische Struktur des 3D-Volumenmodells und die funktionalen Eigenschaften, die ein Produkt im Verlauf seines Lebenszyklus durchläuft. Die einzelnen Produktzustände bauen aufeinander auf. Produktzustände werden in Produktausgangs-, Produktzwischen- und Produktendzustände unterteilt (vgl. [39]). Der Produktausgangszustand beschreibt den Zustand des Rohteils [39]. Der Produktzwischenzustand beschreibt Zustände, die im Verlauf der Umwandlung des Rohteils zum Fertigteil durchlaufen werden [39]. Der Produktendzustand beschreibt das Fertigteil [39], also den Fertigungsendzustand des Werkstücks nach dem Durchlaufen aller Fertigungsschritte.

Die spezifischen Merkmale eines Produktzustands werden Produktdatendefinitionen genannt. Sie beschreiben die Daten des Werkstückinformationsmodell, die für die Ausprägung der werkstückindividuellen Fertigungszustände in der werkstückgetriebene Fertigung benötigt werden. Die Definitionen der Produktdaten sind der Produktdatenversion zugeordnet. Die Produktdatendefinition spezifiziert die einzelnen Produktmerkmale. Zu den Produktdatendefinitionen gehören die Definition der Modellierungshistorie (`ModellierungsDefinition`), der Produktstruktur, der Materialzuordnung (`MaterialDefinition`), der Geometrie und Topologie (`GestaltDefinition`), der Toleranz (`ToleranzDefinition`) sowie der Oberflächeneigenschaften (`OberflächenDefinition`). Jedes Merkmal

4.2 Kennzeichnung von Werkstückmerkmalen und -eigenschaften

verfügt über Attribute und Methoden. Sie sind mit dem Produktzustand verknüpft und über die Konfiguration mit nachgelagerten Prozessen assoziiert. Sie geben damit die Datenstrukturschnittstellen für die nachgelagerte, semantische Verknüpfung von Produkt- und Werkstückzuständen vor. Diese semantische Verknüpfung und der Begriff der Datenstrukturschnittstellen wird in Kapitel 4.2.3 beschrieben.

Das Produktinformationsmodell spezifiziert weitere Strukturen, die für das Konzept zwar nicht erforderlich, jedoch für die Umsetzung der prototypischen Implementierung in Kapitel 5 von Bedeutung sind. Dazu gehören die Klassifikation von Produkten, die Präsentation (Produkt-Präsentation) der Produktdatendefinitionen und der Produktlebenszyklusstatus (ProduktLebensZyklusStatusEnum).

4.2.3 Kennzeichnung von Referenzmerkmalen

Die Kennzeichnung von geometrischen und nicht-geometrischen Merkmalen im 3D-Produktmodell erfolgt in der technischen Produktdokumentation durch die Auszeichnung von Prüfmaßen (vgl. Kapitel 2.2.1). Sie werden bei der Produktabnahme oder während der Fertigung im besonderen Maße geprüft. Die Vorgehensweise wird im vorliegenden Konzept auf die Kennzeichnung von Merkmalen im 3D-Produktmodell, die für die Ausprägung von werkstück-individuellen Fertigungszuständen benötigt werden, übertragen.

Prüfmaße sind durch semantische Annotationen gekennzeichnet. Im nachfolgenden Kapitel werden einerseits die semantische Repräsentation der Annotationen und andererseits der Begriff der Datenstrukturschnittstellen zur Assoziation von Produktdatendefinitionen aus dem Produktmodell mit den Merkmalsdefinitionen aus dem Werkstückmodells eingeführt.

Informationsmodell zur semantischen Produktannotation

Das Partialmodell zur semantischen Repräsentation der Produktannotationen spezifiziert die Datenstrukturen zur Beschreibung von semantischen Annotationen, die mit dem 3D-Produktmodell assoziiert sind (vgl. Kapitel 2.2.1). Das Partialmodell ist in der Abbildung 4.9 auf Seite 109 im oberen Abschnitt dargestellt.

Die Definition der Annotation ergänzt das Produktinformationsmodell. Annotationen sind Bestandteil der Produktdatendefinition eines Produktzustands (vgl. Kapitel 4.2.2). Die vorliegende Dissertation betrachtet ausschließlich semantische Produktannotationen, die mit der topologisch-geometrischen Struktur des 3D-Volumenmodells assoziiert sind. Nicht-semantische Produktannotationen werden nicht berücksichtigt. Zum Betrachtungsgegenstand zählen Annotationen zur Beschreibung der Materialeigenschaften (MaterialSpezifikation), zur Tolerierung der Abmaße (MaßTolerierung) und der Form- und Lage (FormLageToleranz) sowie zur Spezifikation der Oberflächenbeschaffenheit (vgl. Kapitel 4.2.1).

Die Maßtolerierung ist mit der Definition der Toleranz in der geometrischen Struktur des 3D-Produktmodells assoziiert. Vom Konzept werden nur Maßeintragungen berücksichtigt, die explizit als Prüfmaß im Sinne der technischen Produktdokumentation gekennzeichnet worden sind, da nur diese als notwendige Angaben für die qualitätsgerechte Herstellung eines Werkstücks gekennzeichnet worden sind (vgl. Kapitel 2.2.1). Die Maßeintragungen werden innerhalb des Konzepts in lineare Maßtoleranzen und in Winkeltoleranzen unterteilt. Abbildung 4.9 stellt im unteren Abschnitt die Unterschiede zwischen den beiden genannten Toleranzausprägungen dar. Sowohl lineare Maßtoleranzen als auch Winkeltoleranzen besitzen ein numerisches Nennmaß sowie in Abhängigkeit des

4.2 Kennzeichnung von Werkstückmerkmalen und -eigenschaften

Toleranztyps ein numerisches, oberes und unteres Grenzabmaß beziehungsweise eine ISO-Toleranzklasse mit Grundabmaß und Toleranzgrad⁵.

Die FormLagetoleranz ist mit der Definition der geometrischen Gestalt des 3D-Produktmodells assoziiert. Für das Konzept wird ausschließlich das tolerierte Element als Spezialisierung der Form- und Lagetoleranz berücksichtigt. Es beschreibt die geometrische Toleranz. Abbildung 4.9 stellt im unteren Abschnitt die geometrische Toleranz dar. Sie ist definiert durch eine Toleranzart, einen numerischen Toleranzwert und ein Bezugselement. Die Toleranzart spezifiziert die Form- oder Lage der Toleranz. Der numerische Toleranzwert gibt die maximal zulässige Abweichung vom Bezugselement an.

Die Materialspezifikation verweist auf die Definition der Materialkennung in den Attributen des 3D-Produktmodells. Die Materialkennung wird als Zeichenkette repräsentiert.

Die Oberflächenbeschaffenheit ist mit den Rauheitswerten in der Definition der Oberfläche des 3D-Produktmodells assoziiert. Sie enthält bis zu zwei numerische Oberflächenkenngrößen, eine textuelle Beschreibung des Fertigungsverfahrens, eine Charakteristik für die Beschreibung der Rillenrichtung sowie eine numerische Angabe zur Bearbeitungszugabe⁶.

Diese semantischen Annotationen werden als Referenzmerkmale bezeichnet. Die Abhängigkeit von Referenzmerkmalen und Werkstückmerkmalen wird im nachfolgenden Kapitel erläutert.

Vernetzung von Produkt- und Werkstückinformationsmodell

Für die durchgängige Beschreibung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen besteht zwischen Produkt- und Werkstückinformationsmodell ein

⁵ Weitere Informationen zur geometrischen Produktspezifikation mit dem ISO-Toleranzsystem für Längenmaße finden sich unter anderem in [43, 53].

⁶ Weitere Informationen zur Angabe der Oberflächenbeschaffenheit in der technischen Produktdokumentation finden sich unter anderem in [37, 53].

4 Konzept

Abhängigkeitsverhältnis (vgl. Kapitel 4.2.2). Abbildung 4.9 auf Seite 109 und Abbildung 4.10 auf Seite 109 bilden die Beziehungsstrukturen ab.

Das Produktinformationsmodell spezifiziert die Produktzustände. Der Produktzustand bildet den informationstechnischen Referenzzustand zu einem Werkstückzustand. Falls der Werkstückzustand auf einen bestehenden Produktzustand verweist, ist somit der Zustand mit dem Referenzzustand korreliert (KorrelierterZustand). Werkstückzustand und Referenzzustand müssen in diesem Fall über Datenstrukturen verfügen, die den informationstechnischen Vergleich der enthaltenen Werkstückmerkmale und Produktdatendefinitionen ermöglichen. Es besteht eine Abhängigkeitsbeziehung zwischen dem Produkt- und dem Werkstückinformationsmodell. Der informationstechnische Vergleich über Referenzmerkmale wird nachfolgend beschrieben. Ist kein Referenzzustand mit einem Werkstückzustand verknüpft, ist der Werkstückzustand unkorreliert (UnkorrelierterZustand). Unkorrelierte Zustände repräsentieren ungeplante Fertigungszustände. Die Analyse der unkorrelierten Fertigungszustände gibt Aufschluss über ungeplante Ereignisse, die sich bei der Fertigung eines einzelnen Werkstücks ereignen können. Sie können im Werkstückinformationsmodell abgebildet, jedoch durch das Werkstück semantisch nicht eigenständig ausgewertet werden.

Die Datenstruktur des Werkstückinformationsmodells leitet sich aus der Datenstruktur der korrelierten Zustände ab (vgl. Abbildung 4.4). Die Referenzmerkmale geben die erforderlichen Datenstrukturen und die Vergleichswerte für einzelne Werkstückmerkmale an. Sie werden daher in der vorliegenden Dissertation in Anlehnung an das UML-Modellelement *Schnittstelle* (englisch: interface) als Datenstrukturschnittstelle bezeichnet. Der Werkstückzustand *erbt* dabei die Attribute und Operationen des Referenzzustands. Während der anschließenden Instanziierung wird die Datenstruktur des Werkstückinformationsmodell somit

4.2 Kennzeichnung von Werkstückmerkmalen und -eigenschaften

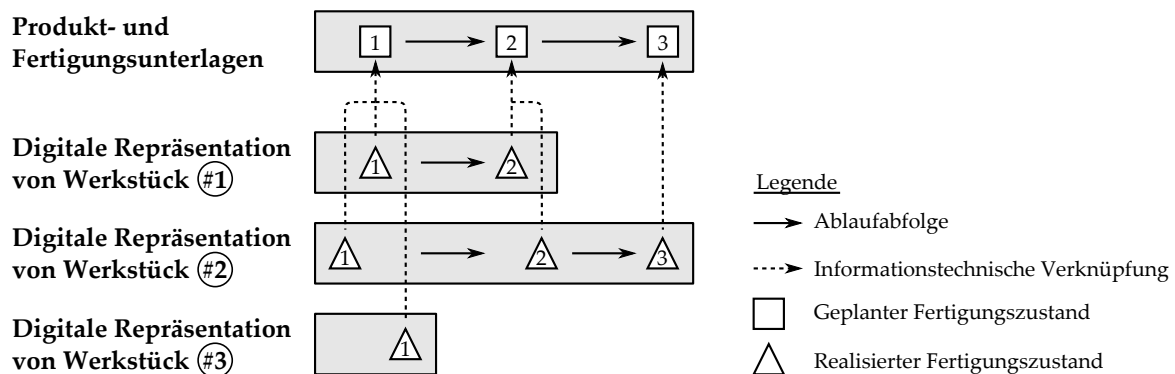


Abbildung 4.4: Abhängigkeitsverhältnis zwischen geplanten und realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszuständen

schrittweise um Werkstückmerkmale in Anlehnung an das Produktinformationsmodell erweitert. Dies wird auch als *late binding* bezeichnet⁷.

Dieses Abhängigkeitsverhältnis zwischen Produkt- und Werkstückinformationsmodell wird im integrierten Werkstückinformationsmodell dynamisch polymorph durch Assoziationen realisiert. Jedes Werkstückmerkmal wird genau einem Referenzmerkmal zugeordnet. Die Zuordnung erfolgt durch die Assoziation der Werkstückmerkmale mit den semantischen Produktannotationen. Die Assoziation ist von der Merkmalsdefinition des Werkstücks auf die Annotation des 3D-Produktmodells gerichtet und unidirektional navigierbar (vgl. Abbildung 4.9 und Abbildung 4.10). Im Speziellen verweist das Materialmerkmal auf die Spezifikation des Materials, das Gestaltmerkmal auf die Maßtolerierung oder die Form- und Lagetoleranz sowie das Technologimerkmal auf die Oberflächenbeschaffenheit.

Der Konstrukteur muss für die Ausprägung werkstückindividueller Fertigungszustände die Referenzmerkmale während der Produktentwicklung explizit kennzeichnen. Das vorliegende Konzept greift auf die vorgestellte Kennzeichnung mittels semantischer Annotationen zurück. Die Methode zur Modellierung

⁷ Weitere Informationen zum *late binding* und dessen Anwendung finden sich unter anderem im [64, 99].

der beschriebenen Zuordnung der Referenzmerkmale zur logischen Fertigungsprozessabfolge in der Werkstückschablone während der Fertigungsplanung ist Gegenstand des nachfolgenden Kapitels.

4.3 Ableitung der Werkstückschablone

Die spanende Fertigung von Werkstücken erfolgt durch die sequentielle Abarbeitung der Arbeitsvorgänge des Ablaufarbeitsplans. Das Werkstück nimmt dabei nach jedem Arbeitsvorgang einen Fertigungszustand ein. Durch die Zuordnung von Referenzmerkmalen zu den einzelnen Arbeitsvorgängen des Ablaufarbeitsplans wird das 3D-Produktmodell in geplante Fertigungszustände zerlegt. Diese beschreiben den idealisierten Fertigungszustand in Bezug zu einem diskreten Arbeitsvorgang, indem sie die erforderlichen Datenstrukturen durch Referenzmerkmale vorgeben. Das nachfolgende Kapitel beschreibt die Vorgehensweise zur informationstechnischen Modellierung und Bereitstellung dieser Referenzmerkmale.

4.3.1 Modellierung der Referenzdatenstruktur

Voraussetzung für Werkstückzustände ist der Ablaufarbeitsplan. Die Erstellung des Ablaufarbeitsplans erfolgt nach den Methoden der auftragsneutralen Fertigungsplanung (vgl. Kapitel 2.2.2). Der Ablaufarbeitsplan listet die einzelnen Arbeitsvorgänge auf. Jeder Arbeitsvorgang ist Bestandteil einer logischen Arbeitsvorgangsabfolge. Innerhalb der logischen Abfolge verweist jeder Arbeitsvorgang dabei auf genau einen Vorgänger und auf genau einen Nachfolger. Die Betrachtung vernetzter Ablaufarbeitspläne mit mehreren konkurrierenden Entscheidungspfaden ist nicht Gegenstand der vorliegenden Dissertation.

Durch die Verknüpfung von Referenzmerkmalen mit den Arbeitsvorgängen wird die Werkstückschablone erstellt. Sie definiert generisch die geplanten

4.3 Ableitung der Werkstückschablone

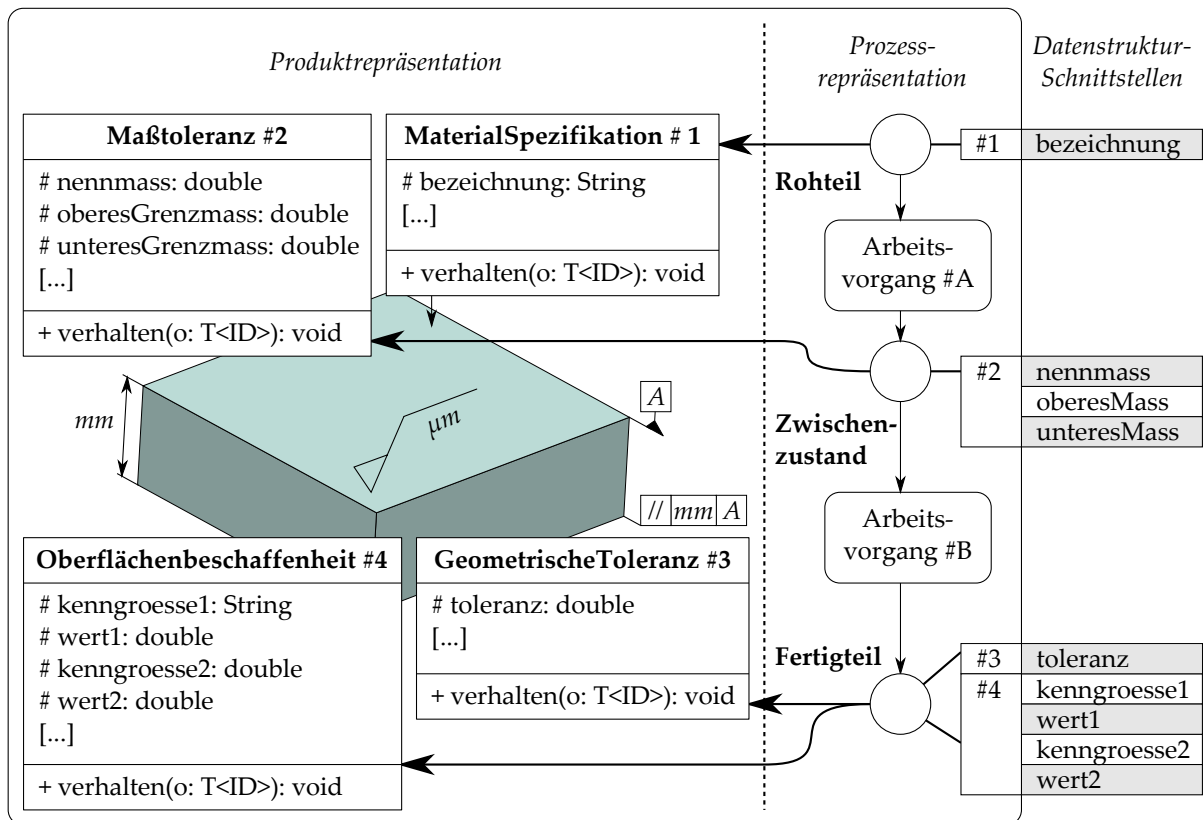


Abbildung 4.5: Schematische Darstellung der Werkstückschablone

Fertigungszustände der zu fertigenden Werkstücke. Abbildung 4.5 stellt die Werkstückschablone schematisch dar.

Voraussetzung zur Erstellung der Werkstückschablone ist eine Liste mit den Referenzmerkmalen. Diese Liste wird aus dem 3D-Produktmodell abgeleitet. Der Fertigungsplaner assoziiert anschließend diese Liste unidirektional mit dem Ablaufarbeitsplan. Jedes Referenzmerkmal wird dabei genau einem Arbeitsvorgang zugeordnet. Diese Zuordnung wird in der vorliegenden Dissertation als Werkstückschablone bezeichnet.

Die Werkstückschablone beschreibt über so genannte Datenstrukturschnittstellen die generische Datenstruktur für die semantische Repräsentation der Werkstückzustände. Diese Datenstrukturschnittstellen geben die erforderlichen Datenentitäten, deren Datentypen und einen Referenzwert für den semantischen

4 Konzept

Vergleich von Werkstück- und Referenzmerkmalen an (vgl. Kapitel 4.2.3). Die Datenstrukturschnittstellen geben also die Datenstrukturen an, die nach den geplanten Fertigungszuständen für die vollständige Beschreibung der werkstückindividuellen Fertigungszustände ausgeprägt werden müssen. Die Ausprägung mit empirischen Entitäten erfolgt nachgelagert während der Fertigung. Empirische Entitäten bezeichnen systematisch erfasste, quantitative Daten zur Beschreibung physischer Sachverhalte in der Fertigung.

Die Datenstrukturschnittstellen der Werkstückschablone sind abhängig vom zugeordneten Referenzmerkmal (vgl. Kapitel 4.2.3). In der Werkstückschablone werden vier Datenstrukturschnittstellen unterschieden (vgl. Kapitel 4.2.2):

- Materialmerkmal (MaterialSpezifikation),
- Gestaltmerkmal für die Maßtolerierung (Maßtoleranz),
- Gestaltmerkmal für die Form- und Lagetoleranz (GeometrischeToleranz) und
- Technologimerkmal (Oberflächenbeschaffenheit).

Diese vier Datenstrukturschnittstellen lehnen sich informationstechnisch an das Informationsmodell zur semantischen Produktannotation an (vgl. Kapitel 4.2.3): Das Materialmerkmal definiert eine Textfolge für die Abbildung der Materialeigenschaft (bezeichnung). Die Textfolge repräsentiert die eindeutige Identifizierung des Materials. Das Gestaltmerkmal repräsentiert je nach Spezialisierungsform eine oder zwei Abmessungen ohne Dimensionseinheit (oberesMass und unteresMass beziehungsweise toleranz). Das Technologimerkmal bildet gemischte Werkstückinformationen ab, indem es mehrere Werte als Textfolge (kenngroesse) beziehungsweise Abmessung ohne Dimensionseinheit (wert) repräsentiert.

4.3.2 Prozessinformationsmodell

Referenzmerkmale und Arbeitsvorgänge sind durch das Prozessinformationsmodell verknüpft. Das Prozessinformationsmodell spezifiziert dazu die erforderliche Repräsentation des Ablaufarbeitsplans. Abbildung 4.11 auf Seite 111 stellt das Prozessinformationsmodell im oberen Abschnitt dar. Die Spezifikation des Prozessinformationsmodells lehnt sich an den REFA-Lehrarbeitsplan an [108].

Durch die Freigabe der Fertigungsplanung ist die Produktdefinition einem Ablaufarbeitsplan (Arbeitsplan) zugeordnet. Ein Ablaufarbeitsplan wird über Arbeitsplanversionen iteriert. Ihm sind in jeder ArbeitsplanVersion mehrere Arbeitsplandefinitionen zugeordnet. Die Arbeitsplandefinition bildet die Abfolge der einzelnen Arbeitsvorgänge des Fertigungsprozesses ab. Arbeitsvorgänge spezifizieren das zu verwendende Ausgangsmaterial, die erforderlichen Arbeitsanweisungen und die Fertigungsressourcen zur Überführung des Ausgangs- in den Endzustand [39, 108]. Je nach Arbeitsfortschritt werden Arbeitsvorgänge in durchgeführte (DurchgeführterArbeitsvorgang) und geplante Arbeitsvorgänge (GeplanterArbeitsvorgang) unterschieden. Sie verweisen auf vorangegangene und nachfolgende Arbeitsvorgänge. Durchgeführte Arbeitsvorgänge verweisen zusätzlich auf einen geplanten Arbeitsvorgang als Referenzarbeitsvorgang. Jeder Arbeitsvorgang wird durch Datenstrukturen zur Beschreibung der Prozesse (ProzessVersion und ProzessDefinition) detailliert.

Die Referenzmerkmale sind über die Produktdefinition dem geplanten Arbeitsvorgang im Prozessinformationsmodell zugeordnet. Die Produktdefinition ist eine Spezialisierung des Produktzustands (vgl. Kapitel 4.2.2). Über den Werkstückzustand sind die Werkstückmerkmale den durchgeführten Arbeitsvorgängen zugeordnet. Durch die Verknüpfung der Produkt- beziehungsweise Werkstückzustände mit den Arbeitsvorgängen einerseits und die Verknüpfung von geplanten und durchgeführten Arbeitsvorgängen andererseits, besteht eine *Relation zwischen Produkt- und Werkstückzuständen*. Über die Arbeitsvorgangsabfolge

4 Konzept

erfolgt das late binding der Informationen (vgl. Kapitel 4.2.3). Jeder Werkstückzustand des Werkstückinformationsmodells verfügt damit über genau einen Produktzustand, der bei der Ausprägung werkstückindividueller Fertigungszustände als Referenzzustand für die Datenstruktur verwendet wird.

Das Prozessinformationsmodell spezifiziert weitere Datenstrukturen, die für das Konzept zwar nicht erforderlich, jedoch für die prototypische Implementierung in Kapitel 5 erforderlich sind. Dazu zählen einerseits die Spezifikation der Prozess- (ProzessPräsentation) und Arbeitsplanpräsentationen, andererseits die Definition der Prozess- (ProzessLebenszyklusStatusEnum) und Arbeitsplanlebenszyklustatus (ArbeitsplanLebenszyklusStatusEnum).

Durch das Prozessinformationsmodell stellt die Werkstückschablone die Produktdatendefinitionen dem Werkstück informationstechnisch als Referenzmerkmale zu logischen Zeitpunkten der nachgelagerten Fertigung bereit. Die eindeutige Identifikation granularer Informationsentitäten in der Werkstückschablone ist dabei erforderlich und im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

4.3.3 Identifikation von Referenzmerkmalen

Die vorliegende Dissertation beschreibt die Modellierung werkstückindividueller Fertigungszustände durch die semantische Verknüpfung von Produkt- und Werkstückinformationsmodell über Referenzmerkmale in der Werkstückschablone. Voraussetzung für die Implementierung des Konzepts ist die eindeutige Identifikation der gekennzeichneten Referenzmerkmale. Diese eindeutige Identifikation ist gleichfalls Bestandteil des integrierten Werkstückinformationsmodells. Abbildung 4.9 auf Seite 109 bis Abbildung 4.11 auf der Seite 111 bilden die Identifikation und die Verknüpfung über Synchronisationsschnittstellen (Synchronisation) an der Produktdaten-, der Werkstückmerkmals- und der Prozessdefinition ab.

Jedes Referenzmerkmal ist durch einen eindeutigen Identifikator identifizierbar. Dieser Identifikator ist ein einheitlicher Bezeichner für eine Ressource (englisch: Uniform Resource Identifier, URI). Eine Ressource beschreibt eine Synchronisationsschnittstelle, die als Webdienst die semantische Repräsentation der in der Ressource hinterlegten Datenstruktur informationstechnisch bereitstellt (vgl. Kapitel 2.3.2).

Für die Identifikation der Synchronisationsschnittstellen bedarf es einer einheitlichen Notation. SPRENGER stellt einen Ansatz für diese Notation vor [121]. Dieser Ansatz basiert auf dem REST-Programmierparadigma für verteilte Systeme (vgl. Kapitel 2.3.2). Er behandelt die Identifizierung von Produktmodellen, hierarchisch gegliederten Baugruppen, Einzelteilen und Topologieelementen durch URI. Dieser Ansatz ist für das vorliegende Konzept unzureichend. Zum einen ist die Identifikation aller geometrischen und nicht-geometrischen Daten innerhalb des 3D-Produktmodells insbesondere der semantischen Annotationen erforderlich, jedoch durch SPRENGER nicht gegeben. Zum anderen nutzt SPRENGER URI ausschließlich zur Identifizierung und nicht zur Bereitstellung der semantischen Repräsentation der identifizierten Informationsentitäten.

Das vorliegende Konzept arbeitet das REST-Programmierparadigma daher umfangreicher aus. Es lehnt sich in der Gestaltung an das Schema von SPRENGER [121] an und erweitert die Definition unter Berücksichtigung von MASSÉ [88]. Das erweiterte Schema verweist sowohl auf die Informationsentitäten der verschiedenen semantischen Repräsentation zum 3D-Produktmodell und zum Ablaufplan (vgl. Abbildung 4.9 auf Seite 109 bis Abbildung 4.11 auf Seite 111) als auch auf die REST-konformen Webdienste für die Bereitstellung dieser

4 Konzept

semantischen Repräsentationen:

$$\begin{aligned} \text{URI} = & \text{http}(s) : // \text{Host} \downarrow \\ & / \text{KonfigurationProduktID} \downarrow \\ & / \text{MerkmalTyp} / \text{MerkmalID} \downarrow \\ & / \text{SubMerkmalID} - 1 / \dots / \text{SubMerkmalID} - n \downarrow \quad (\text{optional}) \\ & \# \text{Fragment} \quad (\text{optional}) \end{aligned}$$

Das Schema identifiziert jeweils eine einzelne Informationsentität in den hierarchisch strukturierten, semantischen Produkt- und Prozessrepräsentationen. Jeder Bezeichner beginnt dazu mit der Auswahl des Internetkommunikationsprotokolls (http oder https). Die eindeutige Identifikation der Systemressource (Host) schließt sich als Textfolge zur Beschreibung des vollständig qualifizierten Domänennamens (englisch: Fully Qualified Domain Name, FQDN) oder als Internetadresse auf Basis des Internet Protocols (IP) an. Die Identifikation der Konfiguration eines Produktzustands (KonfigurationProduktID) verweist auf die eindeutige Version einer semantischen Produkt- oder Prozessrepräsentation, also auf eine Version des 3D-Produktmodells oder des Ablaufarbeitsplans. Die hierarchische Struktur der semantischen Repräsentationen wird über Merkmalstypen und der Merkmalsidentifikation (MerkmalID) abgebildet. Hierarchisch tiefer liegende Merkmale erweitern die URI (SubMerkmalID-1 bis SubMerkmalID-n). Optional sind einzelne Datenobjekte der durch die Webdienste bereitgestellten semantischen Repräsentationen über Fragmente navigierbar.

Für die vorliegende Dissertation werden als Ansatz für die Implementierung in Kapitel 5 drei Merkmalstypen (MerkmalTyp) in der URI für die Identifizierung von Referenzmerkmalen unterschieden:

- *Topologische Merkmale* (im URI-Schema als `pmi_attributes` bezeichnet), verweisen auf die topologische Struktur des 3D-Volumenmodells beispielsweise auf das Materialattribut des Körpers oder die Beschaffenheit einer Oberfläche,

4.4 Ausprägung werkstückindividueller Fertigungszustände

- *Maßtolerierungen* (im URI-Schema als `pmi_dimensions` bezeichnet), verweisen auf die geometrische Struktur des 3D-Volumenmodells beispielsweise auf den Abstand zwischen zwei Flächen oder auf die Lage zweier Linien zueinander, und
- *Prüfmerkmale* (im URI-Schema als `pmi_inspections` bezeichnet), verweisen auf alle semantischen Annotationen des 3D-Produktmodells, die als Referenzmerkmal gekennzeichnet sind.

Wird die `MerkmaleID` nicht in der URI übergeben, wird im Sinne des REST-Programmierparadigma eine Kollektion verfügbarer Ressourcen des gewählten Merkmaltyps zurückgegeben. Die Kollektion enthält eine Liste mit weiteren URI (vgl. Kapitel 2.3.2). Bei der Übergabe der `MerkmaleID` wird die semantische Repräsentation des entsprechenden Merkmals informationstechnisch bereitgestellt. Diese Repräsentation kann eine Kollektion weiterer optionaler Untermerkmale (`SubMerkmaleID`) enthalten.

Das instanziierte, integrierte Werkstückinformationsmodell individueller Werkstücke muss während der Fertigung mit empirischen Informationen zur Beschreibung der werkstückindividuellen Fertigungszustände über die Webdienste angereichert werden. Die Identifikation der Datenstrukturen im Werkstückinformationsmodell wird über die beschriebenen, REST-konformen URI sichergestellt. Die Vorgehensweise zur Ausprägung werkstückindividueller Fertigungszustände mittels REST-Webdienste wird im nachfolgenden Kapitel vorgestellt.

4.4 Ausprägung werkstückindividueller Fertigungszustände

Von der Werkstückschablone zum werkstückindividuellen Fertigungszustand muss das Werkstückinformationsmodell mit werkstückindividuellen Informationen ausgeprägt werden (vgl. Kapitel 4.4.1). Die Werkstückschablone gibt dazu

über die Datenstrukturschnittstellen (vgl. Abbildung 4.5) die Semantik für die Erfassung und Verarbeitung einzelner Werkstückmerkmale vor. Im nachfolgenden Kapitel wird einerseits die Zuweisung erfasster, werkstückindividueller Informationen und Messgrößen zu den Werkstückmerkmalen des instanziierten, integrierten Werkstückinformationsmodells mittels REST-Webdiensten und andererseits deren werkstückindividuelle, semantische Auswertung im Bezug zum Referenzzustand beschrieben.

4.4.1 Zuweisen von Werkstückmerkmalen

Während der industriellen Fertigung einzelner Werkstücke werden werkstückindividuelle Daten und Messgrößen mit Messmitteln wie Koordinatenmessmaschinen, Handmessmitteln oder mittels optischer Verfahren erfasst. Die Auswertung der Messungen liefert quantitative Daten zu einzelnen Werkstückmerkmalen wie Dimensionen, Form- und Lagemaße oder Materialeigenschaften. Das Werkstückinformationsmodell bildet diese Daten in Werkstückmerkmalen ab. Die Werkstückschablone definiert dabei die geforderten, im Rahmen eines Arbeitsvorgangs für die Ausprägung werkstückindividueller Fertigungszustände zu erfassenden Werkstückmerkmale (vgl. Kapitel 4.2.3).

Die werkstückindividuelle, informationstechnische Abbildung von empirischen Werkstückinformationen in einem Werkstückmerkmal des integrierten Werkstückinformationsmodells wird Ausprägung genannt. Sie gliedert sich in drei Schritte:

1. Instanziierung der Datenstruktur des Werkstückinformationsmodells,
2. Transformation der Messdaten in Basiswerkstückmerkmale und
3. Zeitlich versetzte Zuweisung von Messdatenentitäten zu den Werkstückmerkmalen.

4.4 Ausprägung werkstückindividueller Fertigungszustände

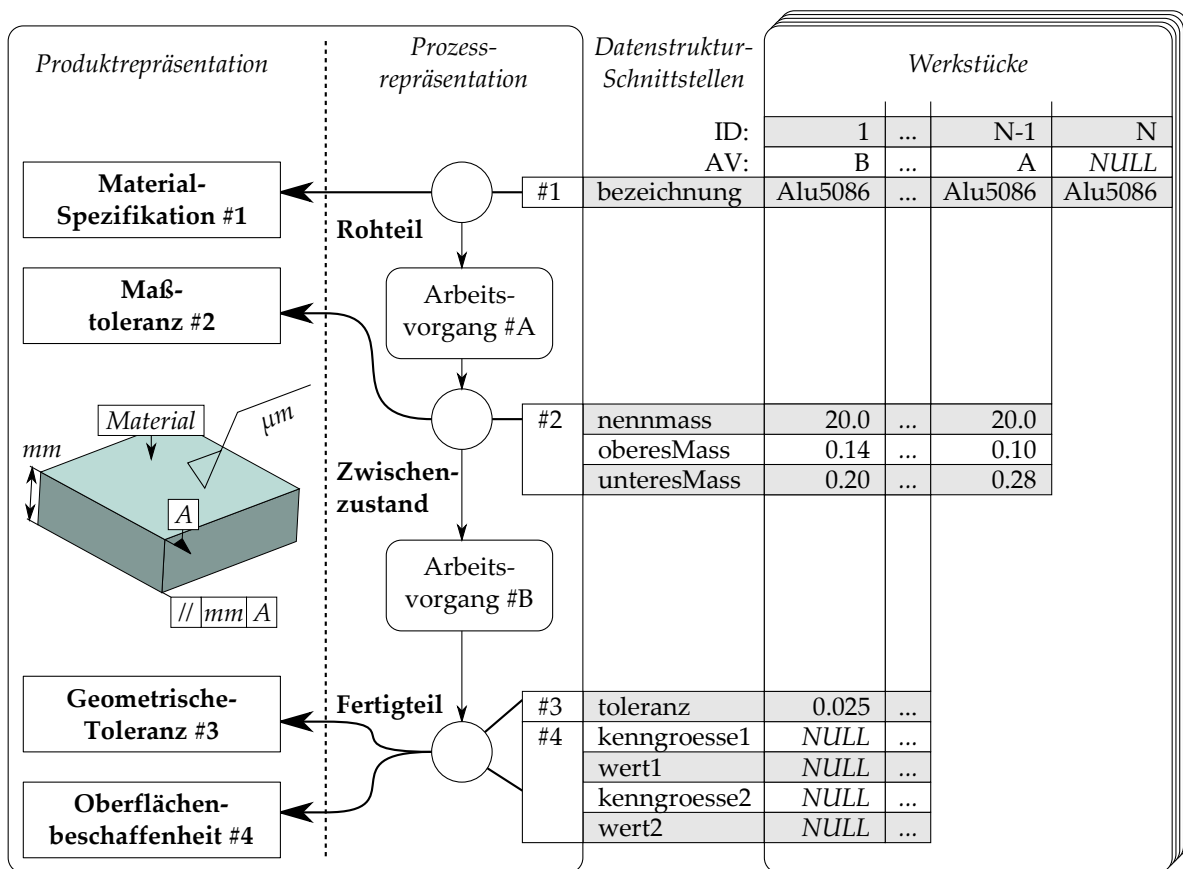


Abbildung 4.6: Schematische Darstellung von instanziierten, integrierten Werkstückinformationsmodellen zu versetzten Zeitpunkten

Die Instanziierung der Datenstrukturen alloziert den in der Deklaration des Werkstückinformationsmodells (vgl. Kapitel 4.2.2) definierten Speicherbereich. Dabei werden die Entitäten der Datenstrukturen mit definierten Vorgabewerten initialisiert. Gleichzeitig wertet die Messanalyse die Messdaten aus und transformiert die Daten in eine informationstechnisch abbildbare Repräsentation in Anlehnung an die Basismerkmale der Werkstückschablone (vgl. Kapitel 4.2.2). Das Werkstück weist die erfassten Werkstückinformationen dem allozierten Speicherplatz informationstechnisch zu. Die Auswertung der Werkstückmerkmale über die Werkstückschablone schließt sich an. Die Abbildung 4.6 zeigt beispielhaft drei Instanzen des integrierten Werkstückinformationsmodells nach verschiedenen Arbeitsvorgängen.

Das Werkstückinformationsmodell wird nach jedem Arbeitsvorgang um Werkstückmerkmalsdefinitionen erweitert (vgl. Kapitel 4.2.2). Die Werkstückschablone gibt über die Datenstrukturschnittstellen für die diskreten Arbeitsvorgänge die erforderlichen Datenfelder vor. Mit Abschluss eines Arbeitsvorgangs werden diese geforderten Werkstückmerkmale mit den empirischen Werkstückinformationen ausgeprägt. Die Auswertung von Werkstückmerkmalen im Bezug zu den Referenzmerkmalen erfolgt nachgelagert. Referenzmerkmale und Werkstückmerkmale müssen dazu aus den föderierten Datenstrukturen aggregiert und zum integrierten Werkstückinformationsmodell integriert werden. Die Informationsaggregation und die Auswertung werden im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

4.4.2 Vergleich von Werkstück- und Referenzmerkmalen

Für die Steuerung der werkstückgetriebenen Fertigung muss das Werkstück die Werkstückmerkmale mit den Referenzmerkmalen aus dem 3D-Produktmodell vergleichen. Die Repräsentation der Werkstückschablone beinhaltet dazu Verknüpfungstabellen, die die Referenz- und die Werkstückmerkmale für die Informationsintegration in Beziehung setzen (vgl. Abbildung 4.6). Das nachfolgende Kapitel beschreibt die Vorgehensweise zur Aggregation, Integration und Auswertung der Datenstrukturen über diese Verknüpfungstabellen.

Informationsintegration

Während der Ausprägung aggregiert das Werkstück die föderierten Datenbestände aus dem 3D-Produktmodell, der Werkstückschablone sowie dem Werkstückmodell und verarbeitet diese informationstechnisch. Für die Topologie der Informationsverarbeitung der verteilten Datenbestände wird im Rahmen der vorliegenden Dissertation der Ansatz der föderierte Informationsverarbeitung verwendet. Die föderierte Informationsverarbeitung integriert die verteilten Datenbestände über definierte Informationsschnittstellen (vgl. Kapitel 2.3.2).

4.4 Ausprägung werkstückindividueller Fertigungszustände

Voraussetzung für die föderierte Informationsverarbeitung ist die eindeutige Identifikation der Datenstrukturen. Das Konzept nutzt für die eindeutige Identifikation von Datenstrukturen die vorgestellten URI (vgl. Kapitel 4.3.3). Für die Bereitstellung der Datenstrukturen verwendet das Konzept die REST-konformen Webdienste (vgl. Kapitel 2.3.2, Kapitel 4.3.3 und Kapitel 4.4.2).

Für die Aggregation stellen die REST-konformen Webdienste sogenannte Kollektionen bereit. Eine Kollektion listet die mit einer Ressource referenzierten, weiteren Ressourcen auf. Im Rahmen der Ausprägung werkstückindividueller Fertigungszustände werden diese Kollektionen informationstechnisch ausgewertet und die einzelnen Datenstrukturen über HTTP-Anfragen aus den Webdiensten geladen (vgl. Kapitel 2.3.2).

Die so aggregierten Datenstrukturen werden anschließend zu einem Gesamtinformationsmodell durch Verknüpfungstabellen integriert. Dieses Gesamtinformationsmodell entspricht der Instanziierung des integrierten Werkstückinformationsmodells. Abbildung 4.7 zeigt eine schematische Darstellung der Verknüpfungstabellen und die zugehörigen Webdienste.

Der Ablaufarbeitsplan (processplan) wird mit den Arbeitsvorgängen (processes) verknüpft. Die Referenzmerkmale aus dem 3D-Produktmodell (parts_annotations) werden mit dem Ergebnis assoziiert (process_inspections). An das Resultat werden die Werkstückinformationen (componententities) eines spezifischen Werkstücks (components) über die Produktdefinition (parts) mit dem Ablaufarbeitsplan angeknüpft.

Informationsverarbeitung

Nach der Aggregation der Referenzmerkmale erfolgt der informationstechnische Vergleich der Datenstrukturen, also der Vergleich von geplanten und realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszuständen. Der informationstechnische Vergleich bedingt den Vergleich identischer Datenstrukturen. Die Datenstruktur

4 Konzept

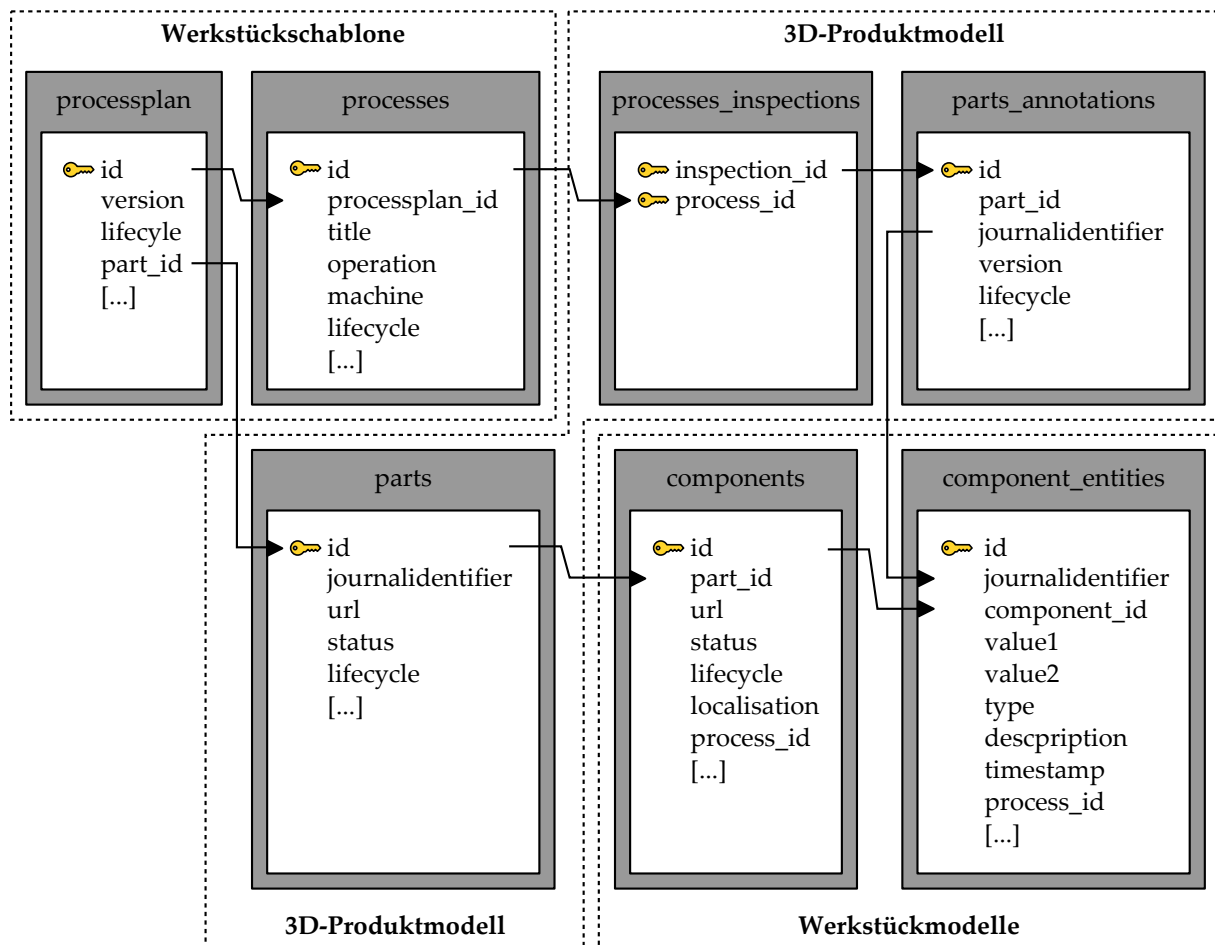


Abbildung 4.7: Schematische Darstellung der Verknüpfungstabellen als visuelle Darstellung von Datenbankschemata

des Referenzmerkmals in der Werkstückschablone gibt die erforderliche Datenstruktur vor (vgl. Kapitel 4.2.3). Die Datenstruktur des Werkstückmerkmals wird während des Herstellungsprozesses auf seine informationstechnische Gleichheit zum Referenzmerkmal überprüft. Die einzelnen Informationsentitäten der Datenstrukturen des Referenz- und des Werkstückmerkmals sind informationstechnisch identisch, falls sowohl der Datentyp als auch die Ausprägung (Wert) informationstechnisch identisch sind.

Mit dieser informationstechnischen Auswertung schließt das Konzept über die Verknüpfung von Referenz- und Werkstückzuständen die Lücke zwi-

schen Produkt- und Werkstückinformationsmodell. Der werkstückindividuelle Ist-Fertigungszustand kann abgebildet und zu dem geplanten Soll-Fertigungszustand in Bezug gesetzt und verglichen werden. Abweichungen zwischen den geplanten und den realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszuständen werden somit identifizierbar. Sie dienen als Entscheidungsgrundlage für die werkstückindividuelle Steuerung nachgelagerter Fertigungsprozesse. Um seine individuelle Fertigung zu steuern, löst dazu das Werkstück bei detektierten Abweichungen zwischen den Fertigungszuständen ein im 3D-Produktmodell definiertes Verhalten aus (vgl. Abbildung 1.1). Das Werkstück sendet dabei eine HTTP-Anfrage an eine Ressource, die im Referenzmerkmal für den Fall einer Abweichung hinterlegt ist und eine Operation in einem REST-Webdienst auslöst. Die Definition dieses Verhaltens muss während der Modellierung des Werkstückverhaltens in der Produktentwicklung erfolgen (vgl. Kapitel 4.2.1 und Kapitel 4.2.3).

4.5 Integriertes Werkstückinformationsmodell

Das integrierte Werkstückinformationsmodell ist die informationstechnische Grundlage für die Ausprägung werkstückindividueller Fertigungszustände. Neben der in Kapitel 4.2.2, Kapitel 4.3.2 und Kapitel 4.3.3 dargestellten Kern- und Partialmodelle sind weitere Modelle zur Abbildung von Aufträgen, Ressourcen und Privilegien Bestandteile des integrierten Werkstückinformationsmodells.

4.5.1 Auftrags- und Ressourceninformationsmodell

Das Auftrags- und das Ressourceninformationsmodell definieren die Schnittstellen für die Anbindung von Anwendungssoftware zur Auftrags- und Ressourcenplanung. Für das Konzept sind die Kernmodelle der Auftrags- und Ressourcenplanung zwar nicht erforderlich (vgl. Abbildung 4.11 auf Seite 111),

4 Konzept

sie sind jedoch ein Bestandteil der Realisierung der prototypischen Implementierung in Kapitel 5.

Das integrierte Werkstückinformationsmodell beinhaltet die Datenstrukturen für die Abbildung der Kunden-, Auftrags- und Kostendaten einerseits und die Abbildung der Werkzeugmaschinen, der Fertigungsmittel, der Materialien sowie des Personals andererseits.

4.5.2 Digitales Informationsrechtenmanagement

Das integrierte Werkstückinformationsmodell bildet unternehmenskritische Produkt-, Prozess- und Werkstückinformationen ab. Für das Informationsrechtenmanagement spezifiziert das integrierte Werkstückinformationsmodell deswegen ein Privilegieninformationsmodell. Privilegieninformationen bilden die für die vorliegende Dissertation erforderliche Benutzer- und Rechteinformationen ab. Sie spezifizieren die Rechte für die Erstellung, Bearbeitung und Löschung von Datenstrukturen.

Das Privilegieninformationsmodell spezifiziert Benutzer und hierarchisch strukturierte Benutzergruppen. Benutzer sind Benutzergruppen zugeordnet. Benutzergruppen können hierarchisch durch weitere Benutzergruppen strukturiert werden. Der Benutzer erbt die Privilegien der Benutzergruppen. Zusätzliche Privilegien können durch Benutzerrollen ergänzt oder überschrieben werden.

Das Privilegieninformationsmodell ist mit den Kernmodellen für die Spezifikation der Auftrags-, Produkt-, Prozess-, Ressourcen- und Werkstückinformationen assoziiert. Jedes Kern- und Partialmodell spezifiziert die Privilegien für seine eigenen Datenstrukturen.

4.6 Fazit

Das Konzept zur informationstechnisch durchgängigen Verarbeitung werkstückindividueller Fertigungszustände wird in diesem Kapitel auf Basis der in Kapitel 3 postulierten Anforderungen für den Anwendungsfall der werkstückgetriebenen Fertigung entwickelt.

Kern des Konzepts ist die Spezifikation des integrierten Werkstückinformationsmodells sowie dessen anschließende Ausprägung zur Beschreibung werkstückindividueller Fertigungszustände durch die Werkstückschablone. Die Werkstückschablone verknüpft dazu Referenzmerkmale aus dem Produktinformationsmodell eindeutig mit den Werkstückmerkmalen des Werkstückinformationsmodells. Die anschließende Ausprägung des individuellen Werkstückinformationsmodells über eine SOA, bestehend aus REST-Webdiensten, erlaubt damit die semantische Verarbeitung werkstückindividueller Fertigungszustände im Kontext des 3D-Produktmodells.

Aufbauend auf dem Werkstückinformationsmodell wird für die informationstechnisch durchgängige Verarbeitung der Werkstückzustände eine Vorgehensweise entwickelt, welche die Modellierung der geplanten und realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszustände in der virtuellen Produktentstehung sicherstellt. Die Vorgehensweise beschreibt die Methoden zur Modellierung von Referenzmerkmalen in der rechnerunterstützten Produktentwicklung, zur Erstellung von geplanten Fertigungszuständen in der rechnerunterstützten Fertigungsplanung und zur Integration mit werkstückindividuellen Fertigungszuständen während der werkstückgetriebenen Fertigung.

Der gesamte Prozess ist auf die durchgängige Informationsverarbeitung durch datenverarbeitende IKT-Systeme in der Produktentstehung ausgelegt (vgl. Abbildung 4.8 in IDEF0-Notation⁸). Zur rechnerinternen Abbildung werden formale

⁸ Weitere Informationen zur Notation Integration Definition for Function Modeling (IDEF0) finden sich unter anderem in [94].

4 Konzept

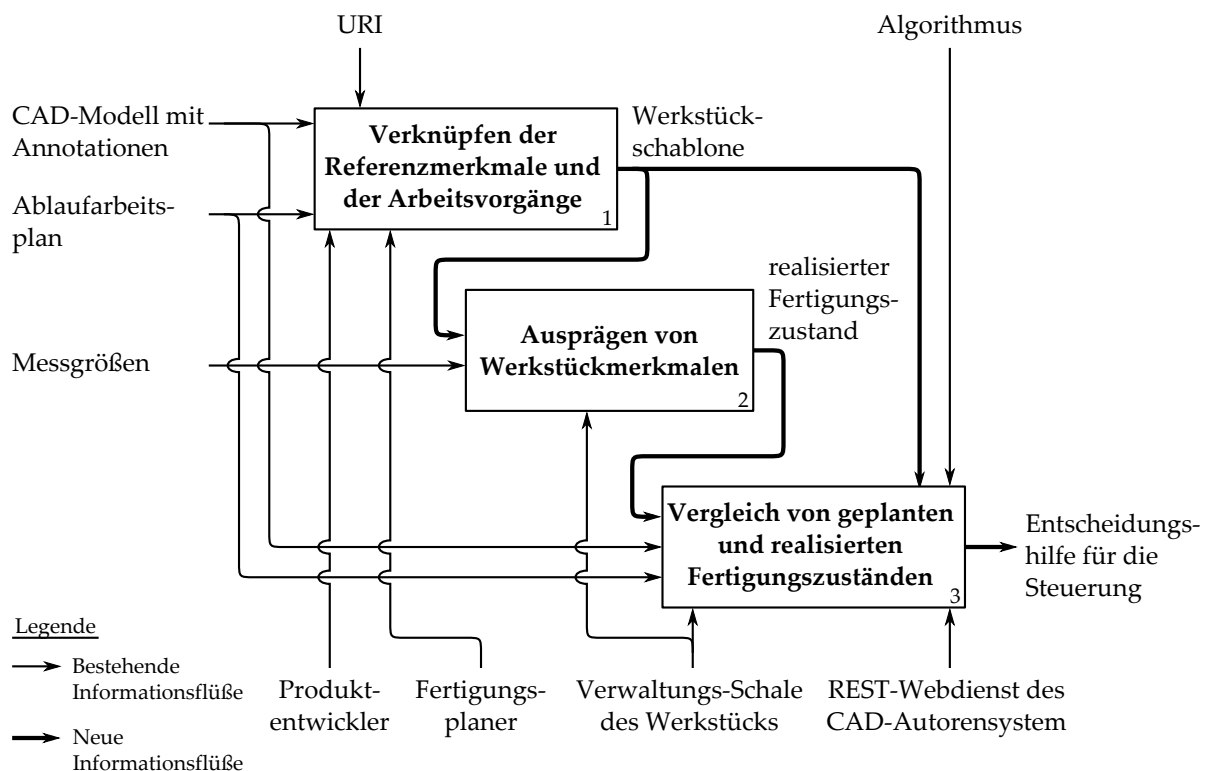


Abbildung 4.8: Informationsprozess zur durchgängigen Ausprägung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen in IDEF0

Informationsmodelle aufgebaut. Sie spezifizieren die für den Prozess erforderlichen Datenstrukturen und Beziehungen. Die Datenstrukturen werden in ein objektorientiertes Informationsmodell, das integrierte Werkstückinformationsmodell, überführt. Das integrierte Werkstückinformationsmodell besteht aus sieben Kernmodellen und drei Partialmodellen. Die Modelle bilden die eindeutige Verknüpfung von Produkt- und Werkstückzuständen über die Definition von Referenzmerkmalen ab.

Das Informationsmodell bildet das informationstechnische Grundgerüst für die prototypische Implementierung in Kapitel 5.

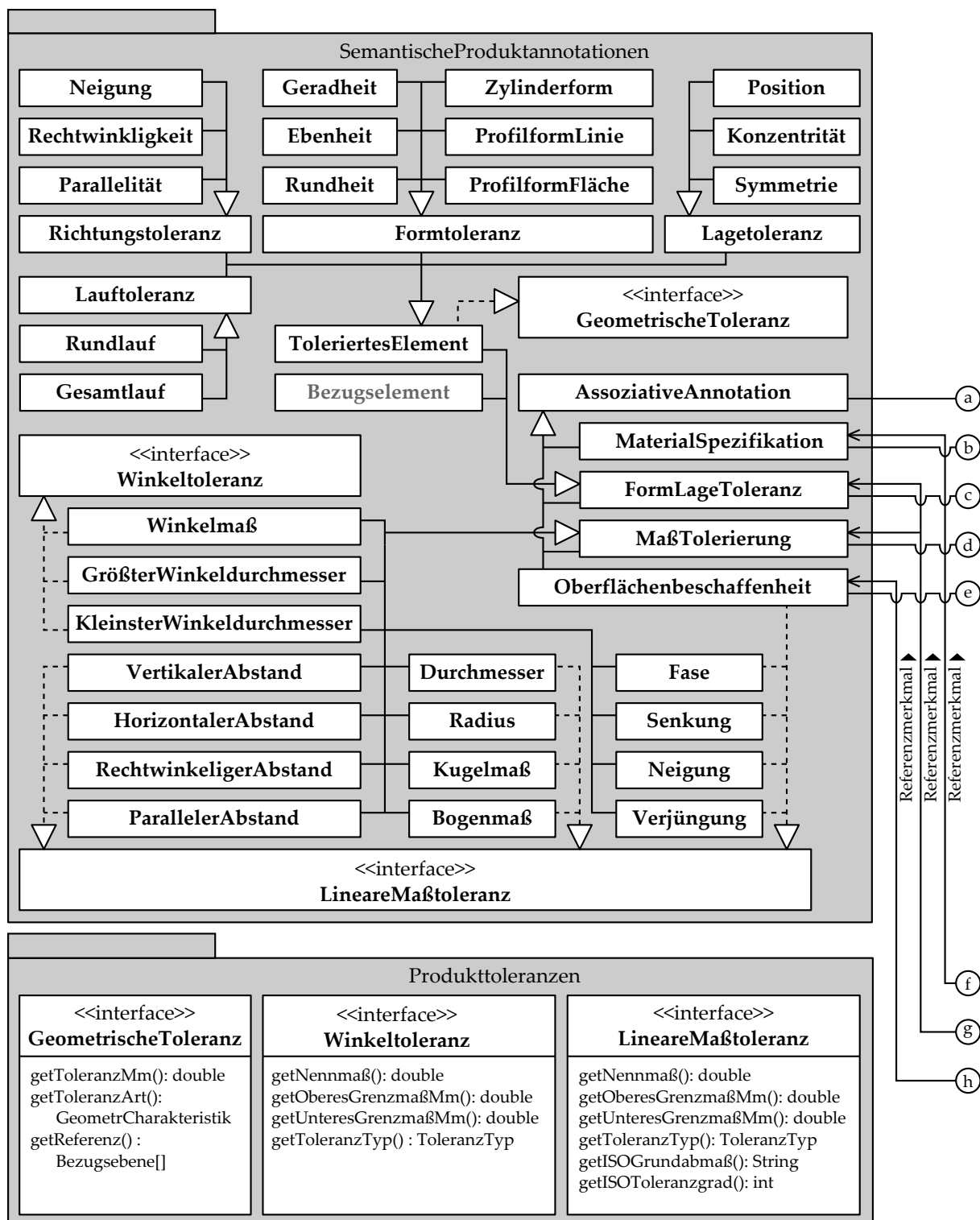


Abbildung 4.9: Integriertes Werkstückinformationsmodell (Links) als vereinfachtes Klassendiagramm in UML-Notation

4 Konzept

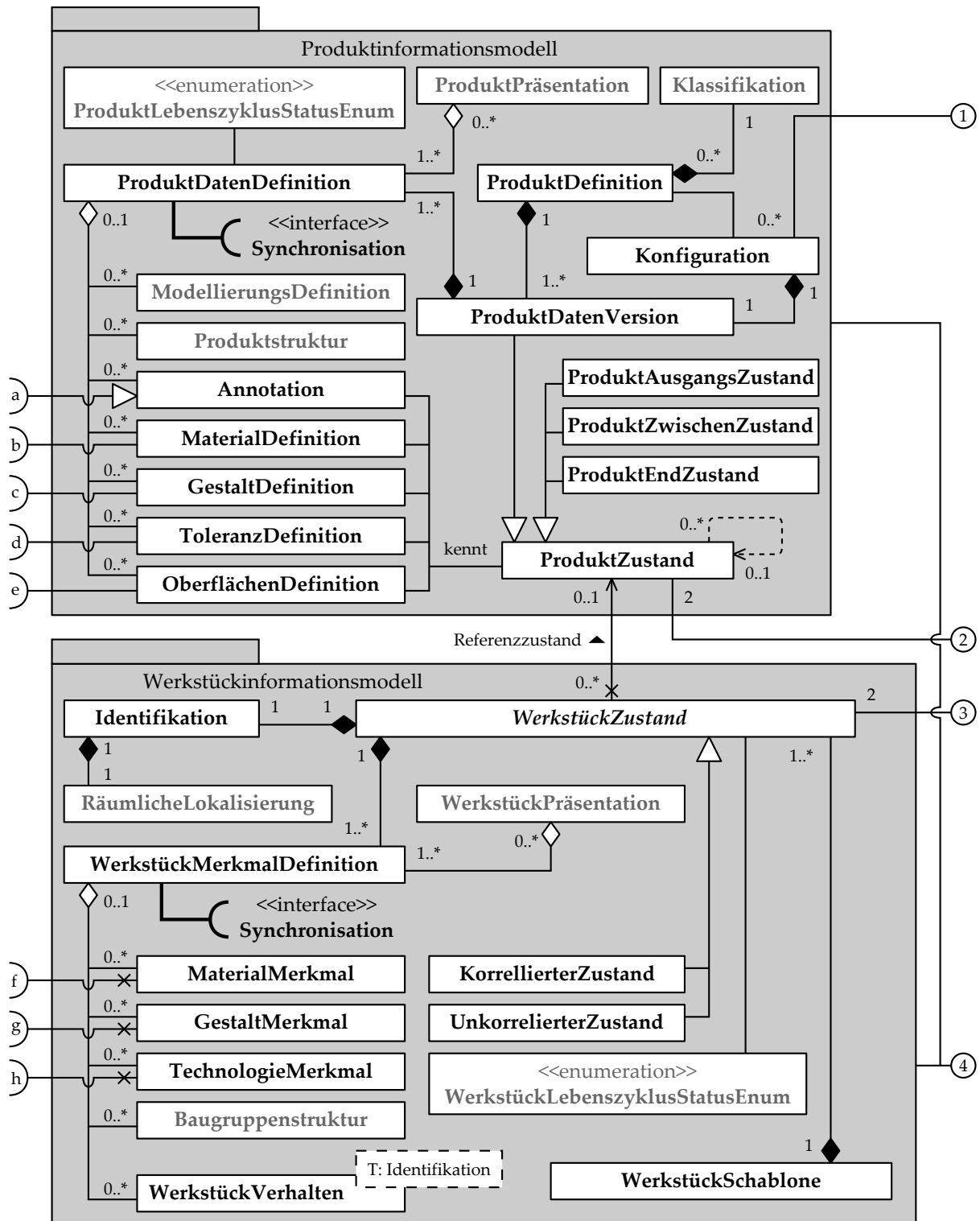


Abbildung 4.10: Integriertes Werkstückinformationsmodell (Mitte) als vereinfachtes Klassendiagramm in UML-Notation

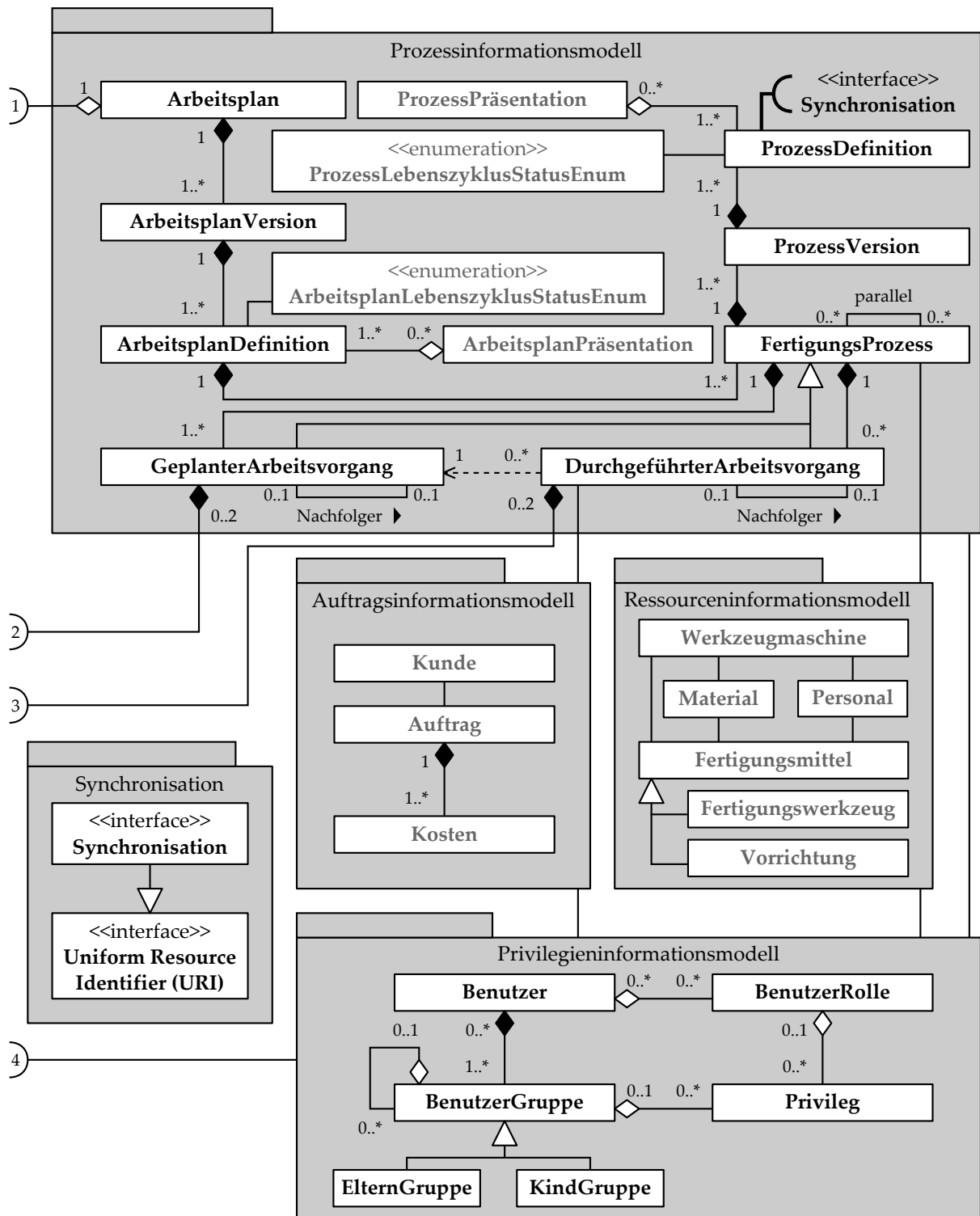


Abbildung 4.11: Integriertes Werkstückinformationsmodell (Rechts) als vereinfachtes Klassendiagramm in UML-Notation

4 Konzept

5

Prototypische Implementierung

Zur Überprüfung der Tragfähigkeit des Konzepts zur Ausprägung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen wird in diesem Kapitel die Realisierung des Konzepts in einer prototypischen Implementierung durchgeführt. Der zu verwirklichende Leistungsumfang der prototypischen Implementierung wird in den Anforderungen in Kapitel 3 spezifiziert.

Der Validierung und Verifizierung der prototypischen Implementierung ist ein eigenständiges Kapitel gewidmet (vgl. Kapitel 6).

5.1 Struktur der technischen Umsetzung

Das in Kapitel 4 vorgestellte Konzept wird im entwickelten Assistenzsystem zur Ausprägung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen (APIZ) realisiert. Die Architektur des Assistenzsystems gliedert sich in sieben Bestandteile. Abbildung 5.1 stellt einen Überblick über die APIZ-Architektur dar.

Das Werkstück als Informationsträger kann in APIZ über REST-Webdienste die geplanten Fertigungszustände abrufen, die vorgelagert in der Produktentwicklung definiert worden sind. Gleichzeitig können werkstückindividuelle Fertigungszustände über eine Webanwendung in der werkstückindividuellen Repräsentation des integrierten Werkstückinformationsmodells abgebildet werden. In der Verwaltungs-Schale der gefertigten Werkstücke werden die geplanten und die realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszustände informationstechnisch verglichen. Das Resultat des Vergleichs kann vereinfacht durch die

5 Prototypische Implementierung

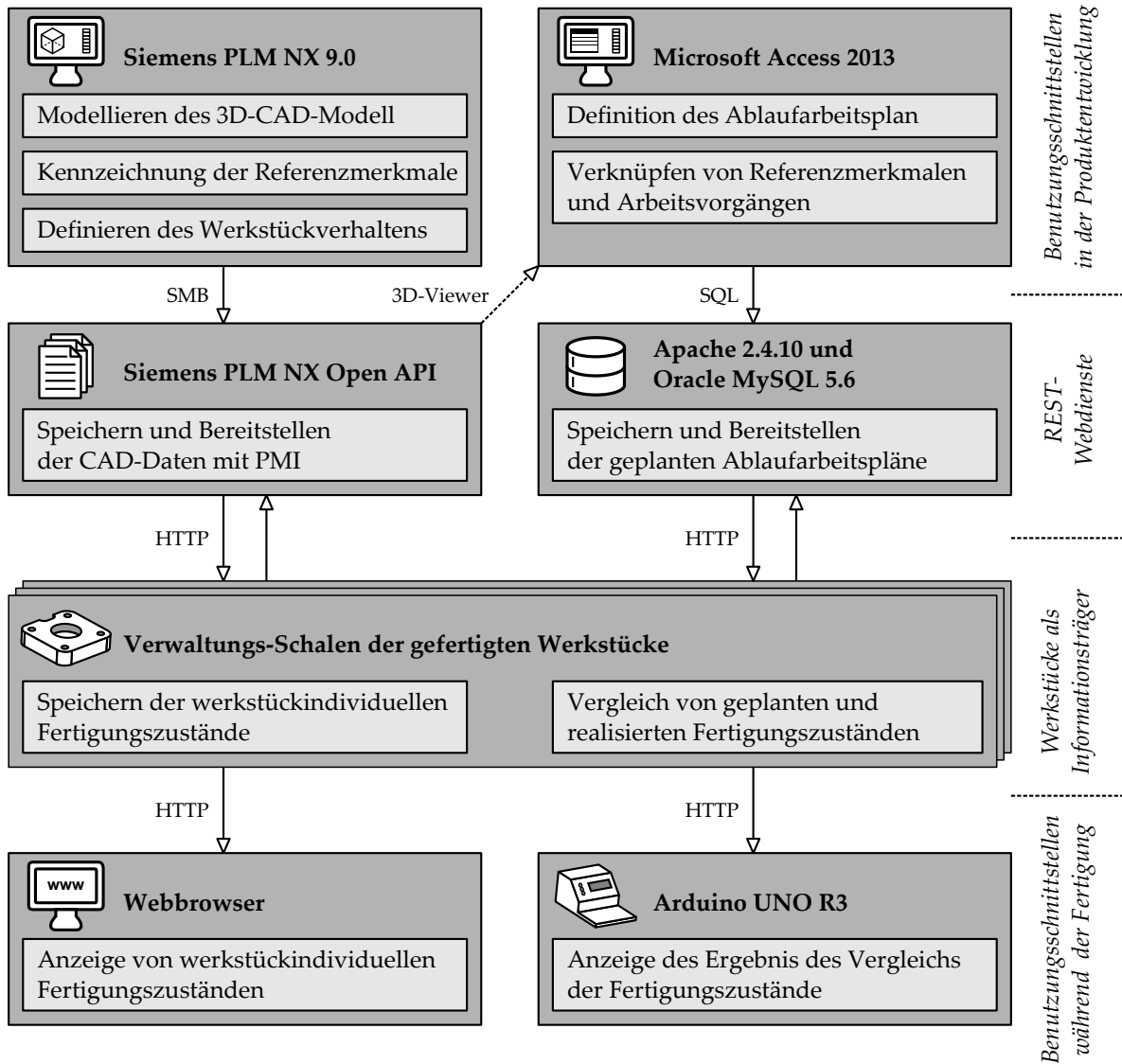


Abbildung 5.1: Überblick über die APIZ-Architektur

Benutzungsschnittstelle in der Fertigung ausgegeben oder detailliert im Webbrowser nachverfolgt werden.

Zentrale Elemente von APIZ sind dabei die digitalen Repräsentationen des integrierten Werkstückinformationsmodells. Sie werden durch die *Verwaltungs-Schalen* der einzelnen Werkstücke als Informationsträger verwaltet und bereitgestellt. Dazu kann die Verwaltungs-Schale realisierte, werkstückindividuelle Fertigungszustände speichern, mit geplanten Fertigungszuständen vergleichen und das Ergebnis über die Webdienste der Verwaltungs-Schale anderen Elementen in APIZ zur Verfügung stellen.

Für den Anwender stellt APIZ vier verschiedene Benutzungsschnittstellen bereit. Diese sind für das rechnerunterstützte Konstruieren und die rechnerunterstützte Fertigungsplanung in der entsprechenden, domänenspezifischen Anwendungssoftware integriert. Dazu gehören zum einen das 3D-CAD-Anwendungssystem *Siemens PLM NX* für die Modellierung des 3D-CAD-Modells inklusive der durch PMI gekennzeichneten Referenzmerkmale und der Definition des Werkstückverhaltens sowie zum anderen eine angepasste Version von *Microsoft Access 2013*, die die Definition des Ablaufarbeitsplans und die Verknüpfung der Referenzmerkmale mit den Arbeitsvorgängen ermöglicht.

Die CAD-Daten sowie die Ablaufarbeitspläne werden durch REST-Webdienste bereitgestellt. Diese sind entweder unmittelbar im 3D-CAD-Anwendungssystem NX integriert oder werden über einen Apache-Webserver mit angebundener Oracle MySQL-Datenbank bereitgestellt.

In der Fertigung stellt das Werkstück eine webbasierte Benutzungsschnittstelle bereit, die mit Anwendungssoftware für die Darstellung von interaktiven Webseiten¹ wie Google Chrome oder Mozilla Firefox bedient werden kann. Diese

¹ Die Anwendungssoftware für die Darstellung von interaktiven Webseiten werden Webbrowser genannt. Neben der Darstellung erlauben sie auch die Ausführung von dynamischen, skriptbasierten Anwendungen.

5 Prototypische Implementierung

webbasierte Benutzungsschnittstelle wird Webanwendung genannt. Sie ermöglicht die detaillierte Anzeige werkstückindividueller Fertigungszustände, den Vergleich geplanter und realisierter, werkstückindividueller Fertigungszustände sowie deren Verlauf. Ergänzend stellt APIZ auch eine Benutzungsschnittstelle bereit, die ausschließlich das Ergebnis des Vergleichs der Fertigungszustände anzeigen kann (vgl. Kapitel 5.3.3). Diese Benutzungsschnittstelle verwendet für die Anzeige einen Mikrocontroller vom Typ Arduino UNO mit ergänzenden Ausgabegeräten.

Die Vernetzung der Komponenten des APIZ-Assistenzsystems erfolgt durch die Verwendung von Socket-Schnittstellen auf Basis von Übertragungssteuerungsprotokollen (TCP) und dem Internetprotokoll (IP). APIZ nutzt insgesamt eine Datenbank- (SQL), eine Dateisystem- (SMB) und vier Web-Socketschnittstellen (HTTP) (vgl. Abbildung 5.1).

5.2 Auswahl der Strukturelemente

Aus der Gesamtstruktur ergeben sich Strukturelemente, die für Umsetzung von APIZ erforderlich sind. Die Auswahl geeigneter Strukturelemente wird in diesem Abschnitt vorgestellt.

5.2.1 Auswahl der 3D-CAD-Anwendungssoftware

Für die Modellierung des 3D-Produktmodells hat sich die Anwendungssoftware des rechnerunterstützten Konstruierens, insbesondere 3D-CAD-Autorensysteme, etabliert. Die im Konzept in Kapitel 4 geforderte Kennzeichnung von Referenzmerkmalen durch semantische Annotationen ist Stand der Technik des Funktionsumfangs etablierter 3D-CAD-Autorensysteme. Die Abbildung von Werkstückverhalten im 3D-Produktmodell, kann, wie vom Konzept gefordert,

durch die Angabe von einem URI als Zeiger auf eine Ressource in den Attributen von semantischen Annotationen realisiert werden (vgl. Kapitel 4.4.2). Das Ergänzen von semantischen Annotationen um solche weiteren Attribute ist durch etablierte 3D-CAD-Anwendungssoftware bereits ebenfalls möglich.

Für die Umsetzung des Konzepts existiert bei etablierten 3D-CAD-Anwendungssoftware jedoch Anpassungsbedarf im Hinblick auf Kommunikationsschnittstellen für die Realisierung der durch das Konzept geforderten REST-konformen Webdienste (vgl. Kapitel 4.4.2). Derzeitige 3D-CAD-Autorensysteme verfügen zwar über Schnittstellen für den Datenaustausch von Neutralformaten und über Schnittstellen für die Identifikation einzelner Produktinformationen (vgl. [121]), insbesondere der topologisch-geometrischen Struktur des 3D-Volumenmodells oder von semantischen Annotationen, aber die Bereitstellung einzelner Produktinformationen über Webtechnologien ist derzeit nicht realisiert. Deswegen besteht bei der Auswahl der 3D-CAD-Anwendungssoftware die Forderung nach einer API zur Implementierung der entsprechender webbasierter Kommunikationsschnittstellen.

Das 3D-CAD-Autorensysteme NX von Siemens PLM erfüllt diese Anforderungen. Es bietet den Modellierungskern Parasolid für die geforderte Modellierung des 3D-Modells und mit der NX Open API eine umfassende Programmierschnittstelle. Die API unterstützt die Programmiersprachen C#, C/C++ und JAVA. Für die Implementierung wird Siemens PLM NX 9.0 und die objektorientierte Programmiersprache JAVA von Oracle in der Version 8.0 eingesetzt. Als Rechnerbetriebssystem kommt Microsoft Windows 8.1 zum Einsatz.

5.2.2 Auswahl der CAPP-Anwendungssoftware

Die rechnerunterstützte Fertigungsplanung erzeugt für die Werkstückfertigung, unter Zuhilfenahme der Konstruktionsunterlagen die Fertigungsunterlagen.

5 Prototypische Implementierung

CAPP-Systeme existieren als alleinstehende Softwarelösungen oder als Bestandteil integrierter Systeme zu Planung des Einsatzes von Unternehmensressourcen (ERP). Diese CAPP-Systeme sind jedoch nach dem Stand der Technik trotz ihres Leistungsumfangs derzeit nicht in der Lage, werkstückindividuelle Fertigungszustände mit geplanten Fertigungszuständen semantisch zu verknüpfen. Es fehlen dazu die Kommunikationsschnittstellen, um den webbasierten Zugriff auf die werkstückindividuellen Fertigungszuständen in den einzelnen Werkstücken sicherzustellen.

In der industriellen Praxis wird für alleinstehende CAPP-Systeme beispielsweise Microsoft Excel eingesetzt. Excel verfügt jedoch nicht über die durch das Konzept geforderten, webbasierten Kommunikationsschnittstellen für den Informationsaustausch. Da Microsoft Access im Gegensatz zu Excel diese erforderlichen, internetbasierten Kommunikationsschnittstellen für die Vernetzung mit anderen Strukturelementen in APIZ, insbesondere für die Anbindung des Datenbanksystems, bietet und um die erforderlichen Funktionalitäten zur Gestaltung des Ablaufarbeitsplan ergänzt werden kann, wird in APIZ die rechnerunterstützte Fertigungsplanung prototypisch statt mit Excel mit Microsoft Access 2013 durchgeführt. Access dient im Rahmen von APIZ der Visualisierung des Ablaufarbeitsplans sowie der Erstellung von geplanten Fertigungszuständen. Die erforderliche Anbindung an die Datenbanken sowie die benötigten Tabelle, Abfragen, Formulare und Automatisierungen sind im Rahmen der prototypischen Implementierung ergänzt worden. Für diese Erweiterung der Funktionalitäten wurde die Access interne Programmierschnittstelle mit der Skriptsprache Visual Basic for Applications (VBA) verwendet.

5.2.3 Auswahl des Architektur für die Datenhaltung

Die 3D-Produktmodelle, die Ablaufarbeitspläne und die realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszustände müssen informationstechnisch persistiert

werden. Diese Datenhaltung muss dabei die Daten konsistent über die Laufzeit der Anwendungen hinaus speichern.

Das 3D-CAD-Autorensystem NX verwendet für die Persistierung des 3D-Produktmodells ein dateibasiertes Datenformat. Die Datenhaltung dieser Dateien übernimmt daher unmittelbar das Betriebssystem. Das Betriebssystem regelt die Persistierung, die Zugriffskontrolle und die Datensicherung. Für die Implementierung von APIZ müssen die Dateien jedoch zentral über einen Webdienst gespeichert werden. Dieser Webdienst gibt ein erforderliches Netzwerkdateisystem frei, welches über das TCP/IP-Kommunikationsprotokoll Server Message Block (SMB) im Dateisystem des Betriebssystems transparent eingebunden ist.

Die Ablaufarbeitspläne sind im Gegensatz zum 3D-Produktmodell entitätsbasiert. Sie sind in Informationseinheiten untergliedert. Für die Datenhaltung muss daher eine relationale Datenbank verwendet werden. Sie kann die entitätsbasierten Informationseinheiten persistieren. Jede Informationseinheit entspricht dabei in der relationalen Datenbank einem oder mehreren über Verknüpfungstabellen in Beziehung gebrachter Datensätze. Als Datenbanksystem kommt Oracle MySQL in der Version 5.6 zum Einsatz. Access wird über SQL-Sockets an dieses Datenbanksystem angebunden, um als Benutzungsschnittstelle zur Anzeige und Bearbeitung der Tabelleneinträge die Definitionen der geplanten Fertigungszustände durch die Verknüpfung von Referenzmerkmalen und Arbeitsvorgängen zu unterstützen.

Die werkstückindividuellen Fertigungszustände werden im instanziierten, integrierten Werkstückinformationsmodell unmittelbar im Speicher der Verwaltungsschale auf dem Werkstück als Informationsträger gespeichert.

5.2.4 Auswahl des Informationsträgers

Integraler Bestandteil von Werkstücken als Informationsträger sind Internet- und Kommunikationstechnologien. Die prototypische Implementierung von

5 Prototypische Implementierung

Werkstücken als Informationsträger in APIZ erfordert eine quelloffene Lösung, die Möglichkeiten zur Funktionserweiterung bietet. In der vorliegenden Dissertation wird sowohl für das Werkstück als Informationsträger als auch die Schnittstelle zur Fertigungsressource die Arduino-Plattform gewählt. Sie besteht aus freien Hard- und Softwarekomponenten. Die Hardwarekomponente der Arduino-Plattform ist ein eingebettetes System auf Basis eines Atmel AVR-Mikrocontrollers mit einer Prozessortaktfrequenz von 16 MHz, einem Arbeitsspeicher von 2 KB und einem Flash-Speicher von 32 KB. Schnittstellen erlauben den Anschluss weiterer elektronischer Komponenten. Die eingesetzten Komponenten nutzen für die Konnektivität Erweiterungen für lokale Netzwerke (LAN) oder Erweiterungen für drahtlose Netzwerke (WLAN) sowie weitere elektronische Bausteine für die Mensch-Maschine-Schnittstellen und die Datenerhaltung.

Als Softwarekomponente stellt die Arduino-Plattform eine integrierte Entwicklungsumgebung für die Programmierung in einem Dialekt der prozeduralen Programmiersprache C zur Verfügung.

5.2.5 Auswahl des Kommunikationsformats

Die Kommunikation zur informationstechnischen Vernetzung der Werkstücke mit der domänenspezifischen Anwendungssoftware bedarf eines einheitlichen Kommunikationsprotokolls und -formats. Die Vernetzung des 3D-CAD-Autorensystems NX mit anderen Systemen ist derzeit auf das internetbasierte Kommunikationsprotokoll TCP/IP beschränkt. Für die Implementierung wird daher das Internetprotokoll HTTP verwendet.

Die in APIZ genutzten Datenstrukturen müssen für die Kommunikation in ein geeignetes Datenformat konvertiert werden. Als kompaktes Datenformat wird die in der IKT-Industrie etablierte JavaScript Objektschreibweise (JSON) verwendet. JSON kennt Datenstrukturen für die Speicherung von Nullwerten, booleschen Werten, Zahlen, Zeichenketten, Arrays und Objekten. APIZ kann

mit JSON alle verwendeten Datenstrukturen abbilden und systemweit in der Kommunikation nutzen.

Alle mit dem Werkstück kommunizierenden Bestandteile des Assistenzsystems müssen dafür internetbasierte Kommunikationsendpunkte (Web-Socket) bereitstellen. Jeder Web-Socket besteht aus einer IP-Adresse, einem Internetprotokoll und einen Port. Für NX wird dieser Web-Socket mit Hilfe der Programmierschnittstelle in JAVA und auf der Arduino-Plattform über die integrierte Entwicklungsumgebung in C implementiert.

Die Programmierschnittstelle von Access ist nicht leistungsfähig genug, um Web-Sockets zu realisieren. Es fehlen entsprechende Bibliotheken für die Bereitstellung von Netzwerkfunktionalitäten. Daher muss der bestehende Datenbankserver um einen Webserver ergänzt werden. Dieser Webserver stellt den erforderlichen Web-Socket stellvertretend für Access bereit. Als Webserversoftware in APIZ kommt Apache in der Version 2.4 mit der Skriptsprache PHP in der Version 5.5 zum Einsatz.

5.3 Technische Umsetzung

Im Folgenden werden die Funktionsweisen und Benutzungsschnittstellen des entwickelten Assistenzsystems vorgestellt.

5.3.1 Integration in die rechnerunterstützte Produktentwicklung

Die Ausprägung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen beginnt mit der Kennzeichnung von Merkmalen und -eigenschaften im 3D-CAD-Modell. Die 3D-CAD-Anwendungssoftware NX stellt eine Benutzungsschnittstelle für dessen Modellierung bereit. Dies beinhaltet auch die Benutzungsschnittstelle für die Erstellung von semantischen Annotationen (vgl. Abbildung 5.2).

5 Prototypische Implementierung

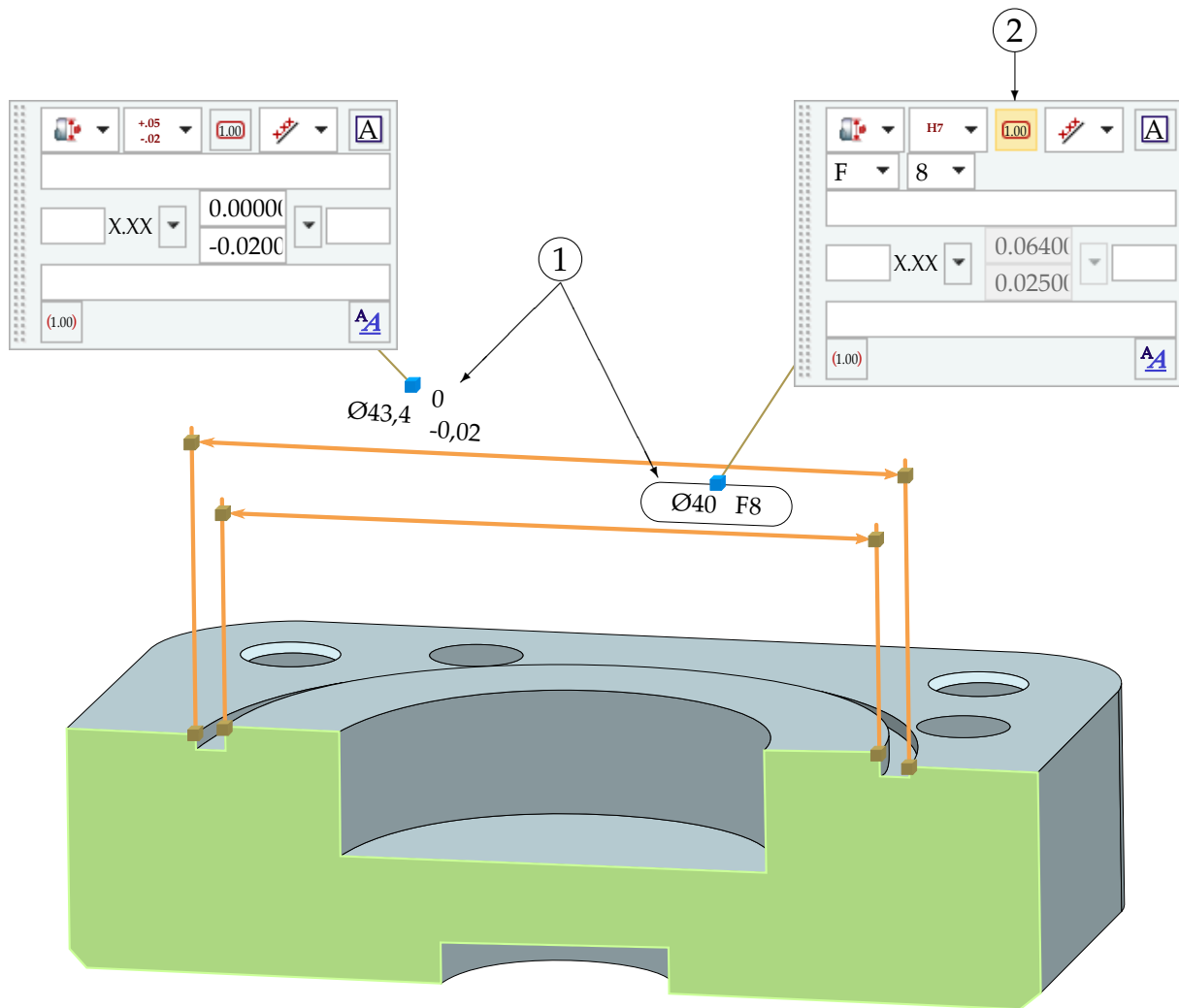


Abbildung 5.2: Kennzeichnung der Prüfmaße an der Schnittansicht eines 3D-CAD-Modells. Das Prüfmaß ist mit einem Rahmen markiert.

Diese Benutzungsschnittstelle findet sich im Menüpunkt PMI. NX bezeichnet mit PMI alle semantischen und nicht semantischen Annotationen des Produkts. PMI steht für Produkt- und Fertigungsinformationen (Product and Manufacturing Information). Für die Kennzeichnung von Referenzmerkmalen werden ausschließlich die folgenden, in NX definierten, semantischen Annotationklassen verwendet:

- **Bemaßung**
(Annotation > Dimension > ILinearTolerance oder
Annotation > Dimension > IAngularTolerance),

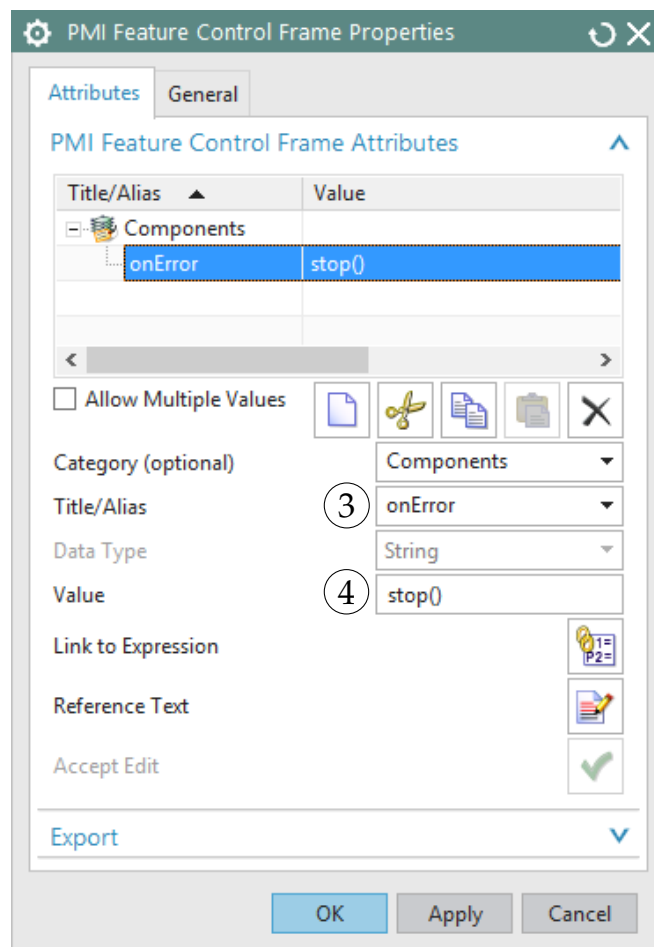


Abbildung 5.3: Modellierung von Produkteigenschaften

- Form-/Lagetoleranzrahmen
(Annotation > DraftingAid > Gdt > Fcf),
- Materialspezifikationen
(Annotation > PmiAttribute > MaterialSpecification) und
- Oberfläche schlichten
(Annotation > PmiAttribute > SurfaceFinish).

Für die Kennzeichnung der Maßeintragungen müssen Bemaßungen abweichend von den anderen semantischen Annotationen zusätzlich explizit als Prüfmaß ① markiert werden (vgl. Kapitel 4.2.3). NX stellt die erforderliche Funktionalität in der PMI-Benutzungsschnittstelle zur Verfügung. Abbildung 5.2 stellt diese

5 Prototypische Implementierung

Benutzungsschnittstelle ② dar. Das gekennzeichnete Prüfmaß wird mit einem Rahmen mit abgerundeten Ecken dargestellt.

Das Werkstückverhalten wird durch die semantischen Annotationen beschrieben. Es wird dazu als optionales Attribut in der semantischen Annotation hinterlegt, indem für jede Abweichung vom einem geplanten Zustand ein Verhalten definiert wird. Für die prototypische Implementierung wird dazu das Attribut *onError* ③ explizit angelegt und das Standardverhalten *stop()* ④ oder ein URI für eine auszulösende Ressource über eine Zeichenfolge dem Attribut zugeordnet (vgl. Abbildung 5.3). Die Ressource wird bei detektierten Abweichungen vom Werkstück abgerufen, um die Entscheidungslogiken für die nachgelagerten Fertigungsprozesse zu bestimmen.

Für die Bereitstellung des annotierten 3D-Produktmodells erweitert APIZ die Funktionalität des 3D-CAD-System um einen REST-konformen Webserver (vgl. Kapitel 4.3.3). APIZ nutzt als Kommunikationsformat JSON (vgl. Kapitel 5.2.5). Die Prozedur 5.1 zeigt den Auszug für ein beispielhaftes JSON-Dokument für das zylindrische Prüfmaß mit dem Identifier *HANDLE R-488174*. Neben identifizierenden und beschreibenden Daten werden auch das Nominalmaß (*nominal_size*) sowie das untere (*lower_tolerance*) und obere Grenzmaß (*upper_tolerance*) abgebildet.

```

1 {
2   "json_row1href":"http://\nbpi:8080\
  zylinderboden_draw\pmi_dimensions\HANDLE R-488174",
3   "json_row1sub":"HANDLE R-488174",
4   "json_row3":0.025,
5   "json_row4":0.064,
6
7   "name":"BREITE_RINGFLAECHE",
8   "class":"PMI_Cylindrical_Dimension",
9   "nominal_Size":40.0,
10  "tolerance":"F8",
11  "lower_tolerance":0.025,
12  "upper_tolerance":0.064,
13  "inspection_dimension":true
14 }

```

Prozedurverzeichnis 5.1: Auszug aus der JSON für ein Prüfmaß

5.3.2 Integration in die rechnerunterstützte Fertigungsplanung

Für die Erstellung von Ablaufarbeitsplänen stellt APIZ eine Benutzungsschnittstelle bereit. Für jede freigegebene Konfiguration eines Produkts wird ein eigener Ablaufarbeitsplan definiert. Abbildung 5.4 und Abbildung 5.5 stellen die Benutzungsschnittstelle dar.

Dazu wird zunächst ein neuer Ablaufarbeitsplan für ein bestehendes 3D-Produktmodell (5) vom Fertigungsplaner angelegt. Für jeden Ablaufarbeitsplan werden die einzelnen Arbeitsvorgänge festgelegt. Der Benutzer muss dazu die Bezeichnung des Prozessschrittes (6), die Identifikation der Arbeitsanweisung (7), die zu verwendende Fertigungsressource (8) sowie den Lebenszyklusstatus des Arbeitsvorgangs (9) eintragen (vgl. Abbildung 5.4).

Dieser Arbeitsvorgang stellt die Basis für einen geplanten Fertigungszustand dar. Für die vollständige Definition eines geplanten Fertigungszustand werden

5 Prototypische Implementierung

Alle Access-Obj... << 10_Prozessplaene 20_Arbeitsvorgaenge 30_Pruefmerkmale

Suchen...

Tabellen

- pi_components
- pi_components_entities
- pi_parts
- pi_parts_annotations
- pi_parts_components
- pi_processes
- pi_processes_inspections
- pi_processplan

Abfragen

- Annotationen
- Arbeitsvorgaenge
- Prozessplaene
- Pruefmerkmale

Formulare

- 10_Prozessplaene
- 20_Arbeitsvorgaenge
- 30_Pruefmerkmale

Arbeitsvorgänge in Prozessplänen

Plan	AV	Prozessbezeichnung	
zylinderboden_draw	1	Ablaengen	B
zylinderboden_draw	2	Waschen	V
zylinderboden_draw	3	Messen der Rohmaterialhoehe	H
zylinderboden_draw	4	Fraesen der Unterseite	C
zylinderboden_draw	5	Fraesen der Oberseite	C
zylinderboden_draw	6	Messen des Oberflaeche	M
zylinderboden_draw	7	Messen der Abmasse	K
zylinderboden_draw	8	Montage Zylinderboden-Dichtung	M
New Part	1		
zylinderboden	3		
zylinderboden_draw	2		

Datensatz: 9 von 9 Gefiltert Suchen

Filter: zylinderboden_draw

Arbeitsanweisung	Ressource	Lebenszyklusstatus
Bandsaegeautomat_Kasto-SBA-A2_0020	Bandsaegeautomat_Kasto-SBA-A2-001	Freigegeben
Waschen-0001_0001	Wasching-001	Freigegeben
Handmess-0001_0001	Handmess-001	Freigegeben
CNC-Frase_DMC-50H_Turm1-Pos4-0001	DMC50H-001	Freigegeben
CNC-Frase_DMC-50H_Turm1-Pos4-0002	DMC50H-002	Freigegeben
MarSurf-GD25_0001	MarSurfGD25-001	Freigegeben
KoordinantenMess-Leitz-PMM-864_0001	LeitzPMM864-001	Freigegeben
Montage_AP3_0001	MontageAP-003	Freigegeben
		in Arbeit
		in Arbeit
		in Prüfung
		Freigegeben
		in Änderung
		Inaktiv

Abbildung 5.4: Modellierung des Ablaufarbeitsplans (Ausschnitt)

The screenshot displays the Microsoft Access interface. On the left, the 'Alle Access-Obj...' pane shows a tree view with 'Formulare' expanded to '30_Pruefmerkmale'. The main window shows a table named 'Prüfmerkmale für die Prozesspläne' with a filter set to 'zylinderboden_draw'. The table has the following columns: AV, Prozessbezeichnung, Prüfmerkmal, ID, and Produkt. The data rows are as follows:

AV	Prozessbezeichnung	Prüfmerkmal	ID	Produkt
1	Ablaengen	MATERIAL	7	zylinderboden_draw
3	Messen der Rohmaterialhoehe	HOEHE_ROHMATERIAL	9	zylinderboden_draw
6	Messen des Oberflaeche	OBERFLAECHE_OBERSEITE	3	zylinderboden_draw
7	Messen der Abmasse	BREITE_RINGFLAECHE	4	zylinderboden_draw
7	Messen der Abmasse	BREITE_ZYLINDERBODEN	8	zylinderboden_draw
7	Messen der Abmasse	HOEHE_DICHTFLAECHE	2	zylinderboden_draw
7	Messen der Abmasse	HOEHE_ZYLINDERBODEN	1	zylinderboden_draw
7	Messen der Abmasse	PARALLELITAET_OBERSEITE	6	zylinderboden_draw
7	Messen der Abmasse	TIEFE_NUT	5	zylinderboden_draw

A dropdown menu is open for the 'Prüfmerkmal' column, showing a list of features and their IDs. Two items are circled: 'Ablaengen' with ID 1 (labeled 10) and 'BREITE_RINGFLAECHE' with ID 8 (labeled 11). The dropdown list includes:

- Ablaengen 1
- Fraesen der Oberseite 5
- Fraesen der Unterseite 4
- Messen der Abmasse 7
- Messen der Rohmaterialhoehe 3
- Messen des Oberflaeche 6
- Montage Zylinderboden-Dicht 8
- Waschen 2
- BREITE_RINGFLAECHE 8
- BREITE_ZYLINDERBODEN 8
- HOEHE_DICHTFLAECHE 2
- HOEHE_ROHMATERIAL 9
- HOEHE_ZYLINDERBODEN 1
- MATERIAL 7
- OBERFLAECHE_OBERSEITE 3
- PARALLELITAET_OBERSEITE 6
- TIEFE_NUT 5

Abbildung 5.5: Zuordnung von Referenzmerkmalen zum Ablaufarbeitsplan

5 Prototypische Implementierung

die gekennzeichneten, semantischen Annotationen aus dem 3D-Produktmodell dem Arbeitsvorgang zugeordnet. Der Arbeitsvorgang kann dazu durch die Auswahl der Prozessidentifikation (10) ausgewählt werden. Die gekennzeichneten, semantischen Annotationen aus dem 3D-Produktmodell (11) werden mit dem Arbeitsvorgang über ihre eindeutige Identifikation, dem HANDLE, verknüpft. Einem Arbeitsvorgang können keine bis beliebig viele Referenzmerkmale (1:n-Beziehung) zugeordnet werden. Jede Zeile in Abbildung 5.5 entspricht einer solchen Zuordnung. Sie stellen die geplanten Fertigungszustände dar.

Die Fertigungsprozessdaten und die Zuordnung der gekennzeichneten Produktmerkmale werden in der Datenbank persistiert (vgl. Kapitel 5.1). Die Bereitstellung der Fertigungsunterlagen erfolgt durch den Webserver. Dieser stellt den Ablaufarbeitsplan im JSON-Format bereit. Die Prozedur 5.2 zeigt den Auszug für einen beispielhaften Ablaufarbeitsplan. Die einzelnen Arbeitsvorgänge sind als einzelne JSON-Objekte abgebildet. Jeder Arbeitsvorgang verweist auf eine Liste (*Kollektion*) mit der Identifikation von Referenzmerkmalen (*inspection*). Die Daten dieser Referenzmerkmale müssen für die Informationsverarbeitung aus dem 3D-Produktmodell über weitere Webdienste geladen werden (vgl. Kapitel 4.4.2).

```
1 {
2     "0":{
3         "inspection":["HANDLE R-690779"],
4         "json_row1":"01",
5         "json_row2":"Ablaengen",
6         "json_row3":"Bandsaegeautomat_Kasto-SBA-A2_0...",
7         "machine":"Bandsaegeautomat_Kasto-SBA-A2-001"
8     },
9     ...
10    "6":{
11        "inspection":[
12            "HANDLE R-356154","HANDLE R-371348",
13            "HANDLE R-488174","HANDLE R-591370",
14            "HANDLE R-598330","HANDLE R-793531"
15        ],
```

```

16     "json_row1":"07",
17     "json_row2":"Messen des Abmasse",
18     "json_row3":"KoordinantenMess-Leitz-PMM-864_...",
19     "machine":"LeitzPMM864-001"
20 },
21 "7":{
22     "inspection":[],
23     "json_row1":"08",
24     "json_row2":"Montage Zylinderboden-Dichtung",
25     "json_row3":"Montage_AP3_0001-R500084C3D7",
26     "machine":"MontageAP-003"
27 }
28 }

```

Prozedurverzeichnis 5.2: Auszug aus der JSON für einen Ablaufarbeitsplan

5.3.3 Integration in die werkstückgetriebene Fertigung

Voraussetzung für Werkstücke als Informationsträger ist die Integration der Informations- und Kommunikationstechnologien in die Prozesskette der Fertigung. Eingebettete Systeme eignen sich für diese Integration und ermöglichen somit die kostengünstige, flexible Realisierung von Industrie 4.0-Komponenten. In der spanenden Fertigung besteht für diese eingebetteten IKT-Systeme jedoch grundsätzlich durch die materialabtragenden Fertigungsprozesse das Risiko, während einzelner Arbeitsprozesse beschädigt oder zerstört zu werden (vgl. [152]). Der Schutz der Hardware ist jedoch kein Bestandteil der vorliegenden Dissertation. Der informationstechnische Ansatz für die Realisierung von Werkstücken als Informationsträger in diesem Kontext wird nachfolgend vorgestellt.

Werkstücke als Informationsträger

In APIZ werden Werkstücke als Informationsträger als autonome Industrie 4.0-Komponente nach der Definition aus Kapitel 2.1 umgesetzt. Werkstücke

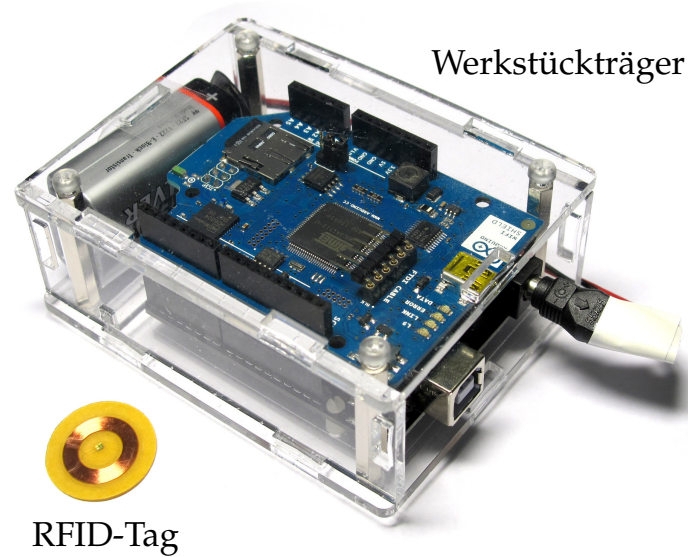


Abbildung 5.6: APIZ-Werkstückträger mit separatem RFID-Tag

als Informationsträger können dabei physisch als Gegenstand oder virtuell als Datenobjekt realisiert werden.

Physische Werkstücke setzen sich aus dem physischen Gegenstand mit einer aktiven Kommunikationsschnittstelle und dem Datenobjekt zusammen [141]. Da die Oberflächen von Werkstücken im Rahmen der werkstückgetriebenen Fertigung durch Materialabtrag spanend umgeformt werden, ist die Einbettung von IKT im physischen Werkstück mit technologischem Aufwand verbunden (vgl. [96]) und in APIZ nicht umsetzbar. APIZ verwendet daher für die Integration von IKT und physischen Werkstücken den Ansatz der *PLATTFORM INDUSTRIE 4.0* (vgl. [104]). APIZ setzt Werkstückträger als Verwaltungs-Schalen ein (vgl. Kapitel 2.1.1). Die Verwaltungs-Schale übernimmt stellvertretend die Informationsverarbeitung des Datenobjekts und die Kommunikation mit der Fertigungsumgebung. Jedes Werkstück wird dabei vor dem ersten Arbeitsschritt genau einem Werkstückträger zugeordnet. Das Werkstück bleibt während des gesamten Fertigungsprozesses seinem Werkstückträger fest zugeordnet und kehrt nach jedem Arbeitsvorgang auf ihn zurück. Abbildung 5.6 stellt einen solchen Werkstückträger dar. Das Werkstück ist somit über den Werkstückträger eindeutig identifizierbar. APIZ nutzt als Identifikationsmerkmal die Radio-Frequency

Identification (RFID) Methode (vgl. [152]). Die Identifikationsnummer kann jederzeit ausgelesen und im Datenbanksystem in einen URI aufgelöst werden. Dieser URI verweist auf das zum Werkstück zugehörige, im Werkstückträger dezentral verwaltete Datenobjekt der digitalen Repräsentation. Über die URI kann der zugehörige Webdienst für die Bereitstellung der digitalen Repräsentation aufgerufen werden.

APIZ setzt für die Informationsbereitstellung und -verarbeitung der digitalen Repräsentation durchgehend auf das Kommunikationsformat JSON. Die Informationsaggregation und -verarbeitung erfolgt für den Benutzer unsichtbar in separaten IKT-Prozessen. Der Benutzer interagiert mit den Werkstücken ausschließlich durch die Webanwendung (vgl. Kapitel 5.1). Abbildung 5.7 und Abbildung 5.8 bildet Ausschnitte aus der Benutzungsschnittstelle ab.

Die Benutzungsschnittstelle stellt eine Präsentation eines geplanten (links) und eines werkstückindividuellen Fertigungszustand (rechts) dar. Die semantische Repräsentation des instanziierten, integrierten Werkstückinformationsmodells wird dazu im JSON-Datenformat in eine HTML-Webseite eingebunden und mit Hilfe der Skriptsprache JavaScript visualisiert.

Die Benutzungsschnittstelle zeigt auf der linken Hälfte von Abbildung 5.7 und Abbildung 5.8 die aus den föderierten Datenbeständen aggregierten Produktinformationen (12). Dargestellt werden unter anderem die produktidentifizierenden Daten wie der Name und die Sachnummer, Systeminformationen wie der Lebenszyklusstatus und die Version sowie Informationen zur geometrischen und topologischen Struktur und zum Verwendungsnachweis. APIZ hebt besonders die gekennzeichneten Referenzmerkmale aus der Werkstückschablone hervor.

Auf der rechten Seite werden die individuellen Werkstückinformationen präsentiert (13). Dargestellt werden unter anderem die werkstückidentifizierenden und -lokalisierenden Daten, der individuelle Ablaufarbeitsplan und Informationen zum Verwendungsnachweis.



Abbildung 5.7: Rückverfolgung des Werkstückzustands (Oben)

Fortsetzung von vorheriger Seite...

15

16

Quantitative Merkmale

Maßeintragungen	Entität:	Soll-Maße:
HOEHE_ZYLINDERBODEN <small>HANDLE R-356154</small>	Perpendicular Dimension 15.0mm	undefined
HOEHE_DICHTFLAECHE <small>HANDLE R-371348</small>	Perpendicular Dimension 14.534mm	-0.1
BREITE_RINGFLAECHE <small>HANDLE R-488174</small>	Cylindrical Dimension 40.0mm	F8
TIEFE_NUT <small>HANDLE R-591370</small>	Vertical Dimension 0.95mm	-0.05
BREITE_ZYLINDERBODEN <small>HANDLE R-793531</small>	Perpendicular Dimension 59.2mm	-0.2
HOEHE_ROHMATERIAL <small>HANDLE R-827469</small>	Parallel Dimension 20.0mm	-0.2

verbergen ^

Gestaltmerkmal	Referenz-ID:	Unteres Abmaß:	Oberes Abmaß:	Status:
<small>[36 Messpunkte: 1,2 + L/400µm]</small>	HANDLE R-356154	-0.00962	0.00720	Fail
<small>[4 Messpunkte: 1,2 + L/400µm]</small>	HANDLE R-371348			Empty
<small>[4 Messpunkte: 1,2 + L/400µm]</small>	HANDLE R-488174	-0.03239	-0.02397	Fail
<small>[12 Messpunkte: 1,2 + L/400µm]</small>	HANDLE R-591370	-0.01737	0.03350	OK
<small>[6 Messpunkte: 1,2 + L/400µm]</small>	HANDLE R-793531	-0.01712	0.40360	Fail
<small>[4 Messpunkte: +0.02/-0.02]</small>	HANDLE R-827469	0.14	0.20	OK

verbergen ^

Geometrische Tolerierungen

Name:	Entität:	Soll-Maß:
PARALLELITAET_OBERSEITE <small>HANDLE R-598330</small>	PARALLEL 0.03mm A	0.03

verbergen ^

Geometrische Tolerierungen

Referenz-ID:	Toleranzmaß:	Status:
<small>[4 Messpunkte: +0.002/-0.002]</small>	HANDLE R-598330	OK

verbergen ^

Spezifikation der Oberflächen

Name:	Entität:	Soll-Maß:
OBERFLAECHE_OBERSEITE <small>HANDLE R-420832</small>	DIN2002: Ra 0.2µm - Mill - C	Ra 0.2

verbergen ^

Oberflächenbeschaffenheit

Referenz-ID:	Toleranzmaß:	Status:
<small>[R_z 0.0560µm - R_max 0.7456µm - R_t 0.8556µm - R_p 0.2634µm]</small>	HANDLE R-420832	OK

verbergen ^

Struktur anzeigen v

Verwendungsnachweis anzeigen v

Baugruppenstruktur anzeigen v

Verwendungsnachweis anzeigen v

12

13

Abbildung 5.8: Rückverfolgung des Werkstückzustands (Unten)

5 Prototypische Implementierung

Im Ablaufarbeitsplan (14) wird die Auswertung des Vergleichs der Produkt- und Werkstückmerkmale visualisiert, indem der aktuelle Arbeitsvorgang mit der Farbe Gelb markiert ist; nicht durchführbare Arbeitsvorgänge beispielsweise aufgrund fehlender oder abweichender Werkstückmerkmale sind mit der Farbe rot markiert.

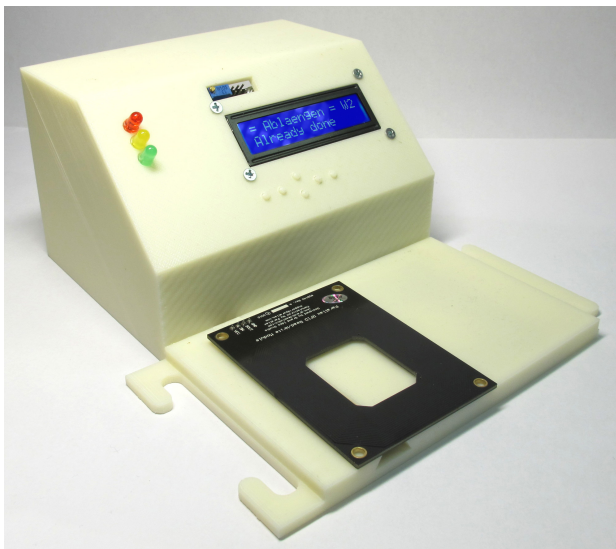
Die detaillierte Auflistung des Merkmalsvergleichs in APIZ ist in (15) und (16) dargestellt. Die Werkstückmerkmale werden zeilenweise mit den Referenzmerkmalen aus dem 3D-Produktmodell verglichen (15) (vgl. Kapitel 4.4.2). Das Resultat dieses Vergleichs ist in (16) dargestellt.

Entscheidungsgrundlage für die Steuerung der Fertigungsprozesse

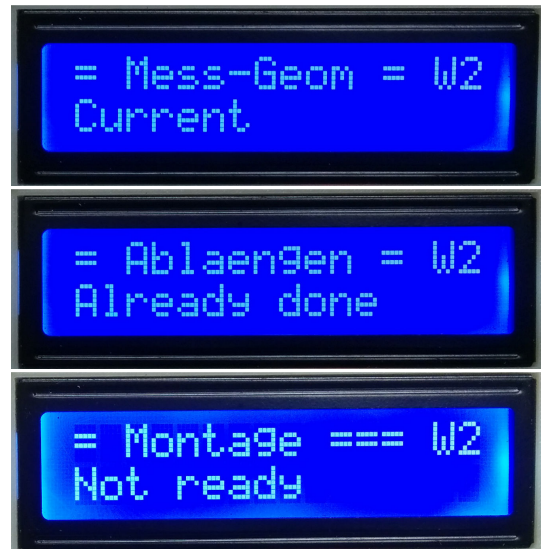
APIZ unterscheidet vier Status (*Ergebnisstatus*) für das Ergebnis der informationstechnischen Auswertung der werkstückindividuellen Fertigungszustände an einer spezifischen Fertigungsressource (vgl. Abbildung 5.9b). Diese Status dienen dem Werker in der Fertigung als Entscheidungsgrundlage für nachgelagerte Fertigungsprozesse. Zu den Status zählen:

- Unknown (Status unbekannt),
- Not ready (Werkstück nicht bereit),
- Already done (Arbeitsvorgang bereits durchgeführt) und
- Current (Arbeitsvorgang in Durchführung).

Die Auswertung aller Werkstückmerkmale eines werkstückindividuellen Fertigungszustands legt den Ergebnisstatus für jeden einzelnen Arbeitsvorgang fest. Die Referenzmerkmale werden dazu aus der zugeordneten Ressource geladen und mittels eines in der Verwaltungs-Schale hinterlegten Algorithmus ausgewertet (vgl. Kapitel 4.4.2). Die Ergebnisstatus werden als Entscheidungsgrundlage für die Steuerung der Fertigung genutzt. Solange der Status des aktuellen Arbeitsvorgang auf Arbeitsvorgang in Durchführung steht,



(a) Mensch-Maschine-Schnittstelle mit integriertem RFID-Leser



(b) Status des Arbeitsvorgangs

Abbildung 5.9: Informationsschnittstelle an der Fertigungsressource

wird der Ablaufarbeitsplan sequentiell abgearbeitet. Andernfalls wird das im 3D-Produktmodell hinterlegte Werkstückverhalten wie beispielsweise Stop oder Ignorieren ausgelöst.

Zur Anzeige der Ereignisstatus muss APIZ für jede Fertigungsressource eine Mensch-Maschine-Schnittstelle bereitstellen (vgl. Abbildung 5.9a). Sie dient als Informationsschnittstelle für den Werker in der Fertigung. Die APIZ-Informationsschnittstelle ist ein eingebettetes System, ausgeführt als Arduino-Komponente mit einer LAN-Erweiterung, um die Konnektivität zwischen Informationsschnittstelle, Webserver und Werkstück sicherzustellen. Ein RFID-Leser ermöglicht die Identifikation von Werkstücken. Das Werkstück wird dabei über den am Werkstück oder am Werkstückträger angehefteten RFID-Chip eindeutig identifiziert. Der eindeutige Bezeichner der Werkstückressource wird über das LAN vom Webserver abgerufen und der individuelle Ablaufarbeitsplan aus der Ressource aggregiert. Die integrierte Anzeige der Informationsschnittstelle gibt den Ereignisstatus des Arbeitsvorgangs im Bezug zur verknüpften Fertigungsressource zurück (vgl. Abbildung 5.9b).

APIZ bietet keine integrierte Lösung zur Steuerung der Fertigungsressource durch die Kommunikations- und Informationseinheit. Die Integration in die zum Teil proprietären Maschinensteuerung muss im Rahmen der Umsetzung in der industriellen Fertigung erfolgen.

Rückverfolgung individueller Werkstückentstehungsprozesse

APIZ ermöglicht die Rückverfolgung individueller Werkstückentstehungsprozesse von physischen Werkstücken. APIZ erweitert dazu den Funktionsumfang des 3D-CAD-Autorensystems NX um die Anzeige des Verlaufs von werkstückindividuellen Fertigungszuständen. Abbildung 5.10 stellt die graphische Benutzungsoberfläche dar.

Für die Rückverfolgung wird das 3D-Produktmodell geöffnet und darin ein 3D-Modell ausgewählt (17). Alle auf Basis des 3D-Produktmodells gefertigten Werkstücke werden zusammen mit identifizierenden und beschreibenden Werkstückdaten in tabellarischer Form (18) aufgelistet. Jede Zeile referenziert dabei genau ein Werkstück.

Nach der Auswahl einer Produktannotation als Referenzmerkmal (19) wird die Verteilungskurve aus allen verfügbaren, werkstückindividuellen Fertigungszuständen ermittelt und als Diagramm (20) dargestellt. Das Diagramm zeigt dabei die in den Werkstücken erfassten Messwerte auf der x-Achse und die absolute Häufigkeit auf der y-Achse. Die einzelnen Werte werden dazu in Hintergrundprozessen über die Webdienste der einzelnen, in der Liste referenzierten Werkstücke aggregiert und deren Häufigkeit aufsummiert.

Um einen ausgewählten, werkstückindividuellen Fertigungszustand mit anderen Fertigungszuständen zu vergleichen, kann optional ein spezifisches Werkstück in der Liste (18) ausgewählt werden. Der minimale und der maximale Messwert des werkstückindividuellen Fertigungszustand wird dann im Diagramm mit roten Begrenzungslinien markiert und der Mittelwert durch eine

17 Produkte

✓ Körper auswählen (1)

18 Werkstücke

Gefertigte Werkstücke:

URL	Zustand	Zeitstempel
... 0123	inaktiv	2015-02-11 ..
... 0124	inaktiv	2015-02-11 ..
... 0125	inaktiv	2015-02-11 ..
R500076C618	aktiv	2015-02-12 ..

Bauteilfertigstellungsprozess öffnen

19 Produktzustand

PMI Referenz auswählen -- Dimension --

✓ PMI Dimension auswählen (1)

Referenzwert: 40.0000

Unteres Toleranzmaß: 40.0249

Oberes Toleranzmaß: 40.064

20 Werkstückzustände

Übersicht Individuell

Anzahl

HANDLE R-488174

Verteilungskurve der Referenzentität

Close

Abbildung 5.10: Rückverfolgung werkstückindividueller Fertigungszustände

blaue Linie ausgezeichnet (20). Der Produktentwickler kann die spezifische Ausprägung eines werkstückindividuellen Fertigungszustand mit den Ausprägungen anderer Werkstücke vergleichen.

5.4 Fazit

APIZ ist im Rahmen der prototypischen Implementierung in das 3D-CAD-System NX und Access integriert worden. APIZ ermöglicht die Modellierung und Planung der Fertigungszustände, simultan zur 3D-Modellierung des Produktvolumenmodells und zur der Erstellung des Ablaufarbeitsplans durchzuführen.

Darüber hinaus stellt APIZ eine Benutzungsschnittstelle für die Darstellung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen über eine Webanwendung bereit. Die Aggregation der Datenbestände zur Instanziierung des integrierten Werkstückmodells erfolgt für den Benutzer verborgen in Hintergrundprozessen der Webanwendung über Webdienste. Der Vergleich geplanter und realisierter, werkstückindividueller Fertigungszustände erfolgt durch algorithmisierte Verfahren in der Verwaltungs-Schale der einzelnen Werkstücke.

Die beschriebenen Webdienste werden auch von der APIZ-Informationsschnittstelle in der Fertigung genutzt. Die APIZ-Informationsschnittstelle in der Fertigung gibt die werkstückindividuelle Auswertung des Vergleich von geplanten und realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszuständen aus. Die Kombination der Auswertung mit der Veranlassung von im 3D-Produktmodell hinterlegten Verhalten erlaubt dem Werkstück dem Werker in der Fertigung eine Entscheidungsgrundlage für die Steuerung der werkstückindividuellen Fertigungsprozesses zu liefern.

6

Validierung des Konzepts

Zur Überprüfung der Tragfähigkeit wird das in Kapitel 5 vorgestellte Konzept an einem repräsentativen Beispiel angewandt und die Plausibilität validiert. Durch die Validierung wird die Anwendbarkeit innerhalb des ausgewählten Anwendungskontextes überprüft. Die Verifizierung des Konzepts gegen die Anforderungen aus Kapitel 3 und die Diskussion der Ergebnisse schließen das Kapitel ab.

6.1 Auswahl des repräsentativen Anwendungsbeispiels

Als repräsentatives Anwendungsbeispiels wird im Rahmen der vorliegenden Dissertation die werkstückgetriebene Fertigung eines Pneumatikzylinderbodens verwendet. Die spanende Fertigung eines solchen Pneumatikzylinderbodens wird im Rahmen der Prozesslernfabrik *Center für industrielle Produktivität (CiP)* an der Technischen Universität Darmstadt durchgeführt. In der Prozesslernfabrik CiP werden Komponenten für Pneumatikzylinder wie beispielsweise der Pneumatikzylinderboden spanend gefertigt und anschließend zur Gesamtbaugruppe montiert. Die Validierung fokussiert auf die Fertigung dieser Pneumatikzylinderböden.

In der Prozesslernfabrik CiP werden die Pneumatikzylinderböden in Form von Werkstücken als Informationsträger ausgeführt. Sie müssen eigenständig hinsichtlich zu erreichender Qualitätsmerkmale die Werkstückmerkmale informationstechnisch verarbeiten, um dem Werker Entscheidungshilfen für die

6 Validierung des Konzepts

Durchführung nachgelagerter Arbeitsvorgänge des individuellen Werkstückentstehungsprozesses bereitzustellen. Im Sinne einer werkstückgetriebenen Fertigung ist dabei die individuelle Steuerung der Fertigungsabläufe durch die Verwendung von Werkstückträgern und Informationsschnittstellen von APIZ sichergestellt (vgl. Kapitel 5.3.3). Die Werkzeuge für virtuelle Produktentstehung werden durch das Forschungslabor am Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion (DiK) bereitgestellt (vgl. Kapitel 5.3.1). Im Forschungslabor stehen für die Modellierung und Persistierung des 3D-Produktmodells und des Ablaufarbeitsplans die 3D-CAD- und CAPP-Anwendungssoftware, die Datenbanksysteme sowie die Webserver zur Verfügung.

Das 3D-Produktmodell eines Pneumatikzylinderbodens vom Typ D40 kennzeichnet neun Referenzmerkmale. Die Merkmale und deren zugehörige Attribute sind in Tabelle 6.1 dargestellt.

Tabelle 6.1: Referenzmerkmale für den Zylinderboden D40

Nr.	Bezeichnung	Nominalmaß	Toleranz
1	BREITE_RINGFLAECHE	40,0mm F8	0,025/0,064mm
2	BREITE_ZYLINDERBODEN	59,2mm	±0,2mm
3	HOEHE_DICHTFLAECHE	14,5mm	±0,1mm
4	HOEHE_ROHMATERIAL	20,0mm	-0,2/0,3mm
5	HOEHE_ZYLINDERBODEN	15,0mm	keine
6	MATERIAL	Aluminum_5086	keine
7	OBERFLAECHE_OBERSEITE	R _a 0,2µm	R _a /0,2µm
8	PARALLELITAET_OBERSEITE	Parallel zu A	0,03mm
9	TIEFE_NUT	0,95mm	±0,95mm

Der Ablaufarbeitsplan für die ausgewählten Pneumatikzylinderböden sieht acht Arbeitsvorgänge vor. Der vollständige Arbeitsplan ist in Abbildung A.3 im Anhang aufgeführt. Tabelle 6.2 stellt einen Ausschnitt aus dem Ablaufarbeitsplan dar. Dargestellt sind Bezeichnungen der Arbeitsvorgänge und die Zuordnung

6.1 Auswahl des repräsentativen Anwendungsbeispiels

von Prüfmerkmalen zu jedem dieser Arbeitsvorgänge für den Pneumatikzylinderboden vom Typ D40.

Tabelle 6.2: Zuordnung von Referenzmerkmalen zu Arbeitsvorgängen aus dem Ablaufarbeitsplan des Pneumatikzylinderboden vom Typ D40

Nr.	Bezeichnung	Referenzmerkmale
1	Ablängen	MATERIAL
2	Waschen	<i>keine</i>
3	Messen der Rohmaterialhöhe	HOEHE_ROHMATERIAL
4	Fräsen der Unterseite	<i>keine</i>
5	Fräsen der Oberseite	<i>keine</i>
6	Messen des Oberfläche	OBERFLAECHE_OBERSEITE
7	Messen des Abmaße	HOEHE_ZYLINDERBODEN, HOEHE_DICHTFLAECHE, BREITE_RINGFLAECHE, TIEFE_NUT, PARALLELITAET_OBERSEITE, BREITE_ZYLINDERBODEN
8	Montage Zylinderboden-Dichtung	<i>keine</i>

Als Werkzeuge für die rechnerunterstützte Ausprägung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen werden die APIZ-Benutzungsoberflächen in NX und in Access zur Modellierung und Erstellung der Fertigungsunterlagen eingesetzt. Die geplanten Fertigungszustände werden anhand des Ablaufarbeitsplans modelliert und die Referenzmerkmale zugeordnet. Die so definierte Werkstückschablone wird über die Webdienste in NX und durch den Apache Webserver für die anschließende Fertigung und Ausprägung werkstückindividueller Fertigungszustände bereitgestellt.

6.2 Durchführung der Validierung

Die Durchführung der Validierung gliedert sich in zwei Phasen. In der ersten Phase wird die virtuelle Produktentwicklung des Pneumatikzylinderbodens durchgeführt. Das 3D-Produktmodell wird in NX modelliert, der Ablaufarbeitsplan in Access erstellt und die Werkstückschablone in Access angelegt. In der zweiten Phase werden Pneumatikzylinderböden maschinell gefertigt, die Messdaten im werkstückindividuellen, instanziierten Werkstückinformationsmodell abgebildet und für die Entscheidungslogik zur Steuerung der Fertigung ausgewertet.

6.2.1 Modellierung der Werkstückschablone

Das 3D-Volumenmodell des Pneumatikzylinderbodens ist in der Benutzungsschnittstelle von NX nach den Methoden des rechnerunterstützten Konstruierens modelliert worden. Parallel sind semantische Annotationen für die in Tabelle 6.1 vorgegebenen Referenzmerkmale erstellt worden. Für jedes Referenzmerkmal wurde ein Verhalten definiert, das vom Werkstück bei erkannten Abweichungen zwischen geplanten und realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszustand ausgeführt werden soll. In NX wurde dafür in jedem PMI das Attribut *onError* angelegt (vgl. Kapitel 5.3.1) und das Verhalten *stop()* definiert (vgl. Abbildung 5.3). Das Werkstück soll bei detektierten Abweichungen die weitere sequentielle Abarbeitung des Arbeitsablaufplans unterbrechen. Abbildung 6.1 stellt das modellierte 3D-Produktmodell inklusive der Referenzmerkmale dar.

Anschließend sind die geplanten Fertigungszustände mit APIZ definiert worden. Dazu ist im ersten Schritt der Ablaufarbeitsplan in Access erstellt worden (vgl. Abbildung 5.4). Die semantischen Produktannotationen sind im nächsten Schritt mit dem Ablaufarbeitsplan verknüpft worden (vgl. Abbildung 5.4). Tabelle 6.2

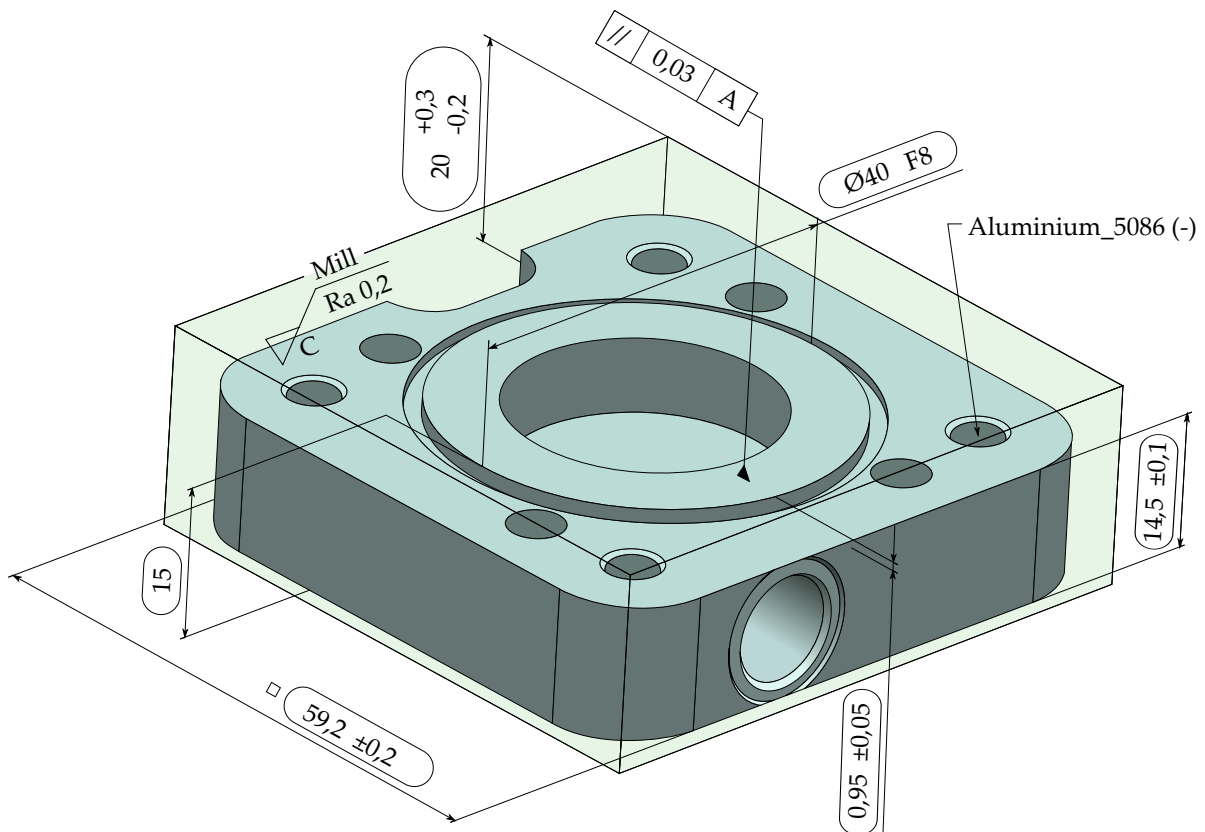


Abbildung 6.1: Pneumatikzylinderboden mit modellierten Referenzmerkmalen

gibt die Arbeitsvorgänge des Ablaufarbeitsplans und die verknüpften Referenzmerkmale vor. Alle geplanten Fertigungszustände sind im letzten Schritt als Werkstückschablone für die Fertigung freigegeben worden.

6.2.2 Steuerung der Fertigung

Für die Überprüfung der Tragfähigkeit sind 126 Pneumatikzylinderböden vom Typ D40 maschinell in der Prozesslernfabrik CiP gefertigt worden. Die Werkstückinformationen sind durch Abmaß- sowie Form- und Lagemessungen mit Hand- und Koordinatenmessgeräten aus der CiP und angegliederten Messlaboren erfasst worden (vgl. Anhang A) und über die APIZ-Webanwendung der Werkstücke in den individuellen Werkstückinformationsmodellen persistiert worden. Die Werkstückschablone liefert dabei aus den Datenstrukturschnittstel-

len die Liste mit den Vorgaben für die zu erfassenden Werkstückmerkmale (vgl. Kapitel 4.2.3).

Während des Herstellungsprozesses ist zudem jedem Werkstück eine eindeutige Identifikation zugeordnet worden. Diese Identifikation ist im RFID-Chip persistiert und an den Werkstückträger geheftet worden (vgl. Kapitel 5.3.3). Der Apache-Webserver kann über REST-Webdienste diese Identifikation in einen URI auflösen und den Strukturelementen in APIZ bereitstellen. Der Pneumatikzylinderboden ist ausschließlich während der Fertigungsprozesse und nur bei eindeutiger Rückzuordnung vom Werkstückträger getrennt worden. Objektdubletten, also doppelt persistierte werkstückindividuelle Fertigungszustände in den Datenstrukturen des integrierten Werkstückinformationsmodells, und damit Redundanzen wurden somit vermieden. Die eindeutige Entität der Werkstücke wurde jederzeit sichergestellt.

Da alle beteiligten Werkstücke und Ressourcen kontinuierlich über das Internet vernetzt sind, erfolgt die semantische Auswertung der Werkstückmerkmale in APIZ automatisch in Hintergrundprozessen. Die erfassten Werkstückinformationen werden dabei dezentral an den Messeinrichtungen ausgewertet und über die Webanwendung von APIZ in der Werkstückschablone persistiert. Tabelle 6.3 gibt einen beispielhaften Überblick über erfasste und in Basismerkmale transformierte Messdaten. Für jedes erfasste Maß gibt die Messauswertung in Anlehnung an die geforderten Datenstrukturen aus der Werkstückschablone für die Toleranzangaben ein einzelnes oder ein unteres und ein oberes Maß aus. Die erfassten Daten werden dann von der Verwaltungs-Schale des Werkstücks über Algorithmen ausgewertet. Diese Algorithmen laden die Daten zu den Referenzmerkmalen aus dem 3D-CAD-System und führen einen informationstechnischen Vergleich mit den erfassten, werkstückindividuellen Merkmalen aus dem Werkstückinformationsmodell durch (vgl. Kapitel 4.4.2). Das Ergebnis dieses Vergleichs für den ausgewählten Beispielzylinderboden ist in Tabelle 6.3 in der Spalte *Status* abgebildet.

Tabelle 6.3: Beispielmessdaten für einen Zylinderboden D40

Nr.	Bezeichnung	Ist-Maße		Status
		unteres	oberes	
1	BREITE_RINGFLAECHE	-0,03239	-0,02397	Nicht OK
2	BREITE_ZYLINDERBODEN	-0,01712	0,40360	Nicht OK
3	HOEHE_DICHTFLAECHE	NULL		Leer
4	HOEHE_ROHMATERIAL	0,14	0,20	OK
5	HOEHE_ZYLINDERBODEN	-0,00962	0,00720	Nicht OK
6	MATERIAL	Aluminum_5086		OK
7	OBERFLAECHE_OBERSEITE	Ra	0,0660	OK
8	PARALLELITAET_OBERSEITE	0,025		OK
9	TIEFE_NUT	-0,01737	0,03350	OK

Im vorgegebenen Beispiel sind vier Prüfmaße nicht valide. Die Breite der Ringfläche (Zeile 1) und die Breite des Zylinderbodens (Zeile 2) liegen beide außerhalb der in der Produktdefinition vorgegebenen Toleranz. Die Umwandlung der ISO-Toleranzangabe für die Breite der Ringfläche (vgl. Tabelle 6.1) in ein oberes und ein unteres Toleranzmaß erfolgt transparent durch NX und wird entsprechend innerhalb der Werkstückschablone dargestellt.

Der Höhe der Dichtfläche (Zeile 3) sind keine Messdaten zugewiesen. Die Persistierung des Prüfmerkmals ist nicht erfolgt. Für den Abschluss des Arbeitsvorgangs ist die Angabe der Messdaten jedoch durch die Datenstrukturschnittstellen der Werkstückschablone gefordert (vgl. Tabelle 6.2). Das Prüfmaß wird daher als leer und somit als nicht valide gekennzeichnet.

Für die Höhe des Zylinderbodens (Zeile 5) sind Messdaten vorhanden und auch persistiert. Der Vergleich schlägt trotzdem fehl. Durch das 3D-Produktmodell ist keine Toleranz vorgegeben. Das Referenzmerkmal ist im Bezug zum Werkstückmerkmal widersprüchlich modelliert. APIZ fördert an dieser Stelle den Kompetenz- und Wissenstransfer von der Fertigung zur Produktentwicklung.

Der dargestellte, beispielhafte Vergleich von geplanten und realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszuständen wurde kontinuierlich während der werkstückgetriebenen Fertigung der 126 Pneumatikzylinderböden durchgeführt.

Der Vergleich der werkstückindividuellen Fertigung wird dem Werker als Entscheidungsgrundlage für die Steuerung der nachgelagerten Fertigungsprozesse über die APIZ-Mensch-Maschine-Schnittstelle bereitgestellt. Bei der Ausführung der einzelnen Arbeitsvorgänge werden die in Kapitel 5.3.3 eingeführten Status ausgegeben. Das vorgegebene Werkstück darf bis zur Behebung der nicht validen Werkstückmerkmale nicht weiterbearbeitet werden. Der Werker wird über das Ergebnis des Vergleichs durch die APIZ-Informationsschnittstelle an der Fertigungsressource informiert (vgl. Abbildung 5.9a). Die Behebung der fehlerhaften Merkmale, die Neuerfassung der Messdaten, die Zuweisung zum Werkstückmodell und der semantische Vergleich über die Werkstückschablone müssen vor der Weiterbearbeitung des Werkstücks erfolgen.

6.2.3 Rückverfolgung der Werkstückhistorie

Die Rückverfolgung werkstückindividueller Fertigungszustände in der Fertigung ist möglich. Sie wird über die APIZ-Webanwendung realisiert (vgl. Abbildung 5.7 und Abbildung 5.8). Alternativ kann die Rückverfolgung werkstückindividueller Fertigungszustände auch in NX erfolgen (vgl. Abbildung 5.10 und Abbildung 6.2). Die APIZ-Benutzungsschnittstelle in NX zeigt dazu die tabellarische Auflistung aller gefertigten und als Entität bekannten Pneumatikzylinderböden ① an. Für ein ausgewähltes Referenzmerkmal in Kombination mit einem ausgewählten Pneumatikzylinderboden wird für den Produktentwickler der Verlauf der erfassten Fertigungszustände und damit der Verlauf des Herstellungsprozesses tabellarisch ② aufgelistet. Parallel kann ein Merkmal eines derzeit realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszustands auch im Vergleich aller persistierten Fertigungszustände visualisiert werden. Abbildung 5.10

stellt den Vergleich in Form einer in APIZ visualisierten Verteilungskurve dar.

6.3 Fazit und Diskussion der Ergebnisse

Die prototypische Implementierung soll die Funktionsfähigkeit des Konzepts zeigen. Die technische Umsetzung im Assistenzsystem APIZ hat dies Anwendbarkeit des Konzepts demonstriert. Anhand des repräsentativen Beispiels eines Pneumatikzylinderbodens wurden die Methoden und Werkzeuge und damit die Tragfähigkeit des entwickelten Konzepts nachgewiesen. Realisierte, werkstückindividuelle Fertigungszustände konnten werkstückindividuell mit den geplanten Fertigungszuständen informationstechnisch verknüpft und durchgängig in den Informationsprozessen der werkstückgetriebenen Fertigung verwendet werden.

Durch die transparente Integration in bestehende Methoden und Werkzeuge der virtuellen Produktentstehung erhöht sich der Modellierungsaufwand für den Produktentwickler nicht. Der Aufwand für den Fertigungsplaner zur Modellierung der Werkstückschablone ist aufgrund der automatisierten, durchgängigen Bereitstellung der Referenzmerkmale und die nahtlose Integration in die Fertigungsplanung gering. Für beide Anwendungsbereiche erfolgt die Erstellung simultan zum konventionellen Modellierungsprozess (vgl. Kapitel 6.2.1). Die Methoden und die bereitgestellten Softwarelösungen erweisen sich als ein realisierbarer Ansatz zur Ausprägung werkstückindividueller Fertigungszustände in den Prozessketten der virtuellen Produktentstehung und der werkstückgetriebenen Fertigung.

Die Integration und Nutzung des integrierten Werkstückinformationsmodells in den Informationsprozessen der werkstückgetriebenen Fertigung soll anhand des Validierungsbeispiels demonstriert werden. Die Webanwendung reduziert dabei die Komplexität der Informationsbereitstellung und -eingabe für den

6 Validierung des Konzepts

①

Produkte

✓ Körper auswählen (1)

Werkstücke

Gefertigte Werkstücke:

URL	Zustand	Zeitstempel
... 0123	inaktiv	2015-02-11 ..
... 0124	inaktiv	2015-02-11 ..
... 0125	inaktiv	2015-02-11 ..
R500076C618	aktiv	2015-02-12 ..

Bauteilentscheidungsprozess öffnen

Produktzustand

PMI Referenz auswählen -- Dimension --

✓ PMI Dimension auswählen (1)

Referenzwert: 40.0000

Unteres Toleranzmaß: 40.0249

Oberes Toleranzmaß: 40.064

Werkstückzustände

Übersicht Individuell

#	Wert 1	Wert 2	Zeitstempel
... 0000	-0.04	-0.02	2015-11-02 ...
... 0001	-0.03239	-0.02397	2015-11-02 ...

Close

Abbildung 6.2: Rückverfolgung der Werkstückhistorie

Benutzer. Das entwickelte Assistenzsystem unterstützt überdies den informationstechnischen Wissens- und Kompetenztransfer im Sinne der wissensbasierten Konstruktion (englisch: Knowledge-based Engineering, KBE) [14, 16, 130]. Einerseits können während der virtuellen Produktentwicklung Informationen zu physischen Entstehungsprozessen individueller Werkstücke abgerufen werden. Andererseits können unvollständige oder widersprüchliche Tolerierungen identifiziert und ergänzt werden.

Potential zur Erweiterung

Bei der Validierung traten im Wesentlichen zwei Fälle auf, die Potential zur Erweiterung des Konzepts aufzeigen. Dies sind zum einen die Modellbildung von Produkten und Werkstücken sowie zum anderen die Beschränkung auf starre Fertigungsprozessabfolgen.

Die Modellierung des Produkts und des Werkstücks geht von vereinfachten und idealisierten Modellen aus (vgl. Kapitel 4.2.1). Bei der Idealisierung des Produkts und des Werkstücks werden Sachstände modellhaft abgebildet. Bei der semantischen Auswertung von Werkstückinformationen werden die abgebildeten Produkt- und Werkstückinformationen anschließend in Bezug gesetzt. Die Akkumulation von Abbildungsfehlern sowie die Reduktion der modellierten Datenstrukturen beispielsweise hinsichtlich der mikrogeometrischen Struktur der Oberfläche ist besonders für sicherheitskritische Werkstücke und spätere Bauteilpaarungen in der Montage kritisch zu sehen. Potential für zukünftige Forschung liegt daher in der Verarbeitung von weiteren semantischen Produktannotationen, die bereits derzeit im 3D-Produktmodell enthalten sein können, aber vom Werkstück aktuell noch nicht interpretierbar sind. Dies beinhaltet im Speziellen Textannotationen oder Annotationen zur auftragsbezogenen Identifizierung von Materialeigenschaften. Die vollständige, semantische Verarbeitung aller über Annotationen bereitgestellten Produktinformationen gilt es in weiteren Forschungstätigkeiten zu untersuchen.

6 Validierung des Konzepts

Der zweite Fall betrifft die Einschränkung des Konzepts auf starre Abfolgen von Arbeitsvorgängen. In seiner derzeitigen Ausprägung unterstützt das Konzept die individuelle Fertigung von Werkstücken nur hinsichtlich der sequentiellen Abarbeitung der Ablaufarbeitspläne. Die Anpassung der Bearbeitungsreihenfolge sowie die Unterstützung verzweigter Fertigungsnetze waren nicht Ziel des entwickelten Konzepts. Nicht definierte Fertigungszustände durch ungeplante Arbeitsvorgänge oder ungeplante Arbeitsvorgangsabfolgen werden deswegen nicht berücksichtigt. Auch die Änderung des Ablaufarbeitsplans durch die semantische Ad-hoc-Verknüpfung von geplanten mit realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszuständen während der Entstehung ist deswegen im Konzept nicht abgebildet.

Verifikation der Anforderungen

Mit der erfolgreichen prototypischen Implementierung und der Validierung wird die Tragfähigkeit und Anwendbarkeit des Konzepts in der virtuellen Produktentstehung der werkstückgetriebenen Fertigung demonstriert. Mit der sich anschließenden Verifikation werden das Konzept und die Implementierung hinsichtlich der in Kapitel 3 definierten Anforderungen anhand der vorgegeben Testfälle geprüft.

Die geforderte Kennzeichnung von Merkmalen für die Ausprägung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen ist mit der Modellierung von PMI im 3D-Produktmodell durch das 3D-CAD-Autorensystem NX vollständig realisiert. NX stellt dabei die Benutzungsschnittstelle bereit, die die Kennzeichnung von Referenzmerkmalen zeitgleich mit der Modellierung ermöglicht. Die gekennzeichneten Merkmale werden in der Produktrepräsentation des 3D-CAD-Modells abgebildet und freigegeben (vgl. Testfall 1). Sie stehen damit informationstechnisch der Fertigungsplanung zur Verfügung (vgl. Testfall 2). Durch die Verwendung von URI nach dem REST-Programmierparadigma ist die eindeutige Zuordnung

der Merkmale zu Arbeitsvorgängen im Ablaufarbeitsplan gewährleistet (vgl. Testfall 3).

Voraussetzung ist die formale Abbildung von werkstückindividuellen Informationen in einem Werkstückinformationsmodell. Das entwickelte, integrierte Werkstückinformationsmodell erfüllt diese Anforderung (vgl. Testfall 4). Durch die Ausprägung der werkstückindividuellen Fertigungszustände stellt das Informationsmodell zudem für jedes Werkstück die eindeutige Zuordnung ihrer Werkstückinformationen zum Ablaufarbeitsplan sicher (vgl. Testfall 5). Die Zuordnung erlaubt mittels algorithmisierter Verfahren die informationstechnische Auswertung von geplanten und realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszuständen (vgl. Testfall 6).

Die semantische Auswertung des Vergleichs stellt dem Werker eine Entscheidungsgrundlage für die Steuerung der im Ablaufarbeitsplan nachgelagerten, individuellen Fertigungsprozesse. Abweichungen zwischen den realisierten Werkstückzuständen und den geplanten Produktzuständen werden dabei identifizierbar und entsprechende Maßnahmen können vom Werkstück vorgeschlagen werden. Die entsprechenden Vorschläge für Maßnahmen können in den Attributen der gekennzeichneten PMI hinterlegt werden (vgl. Testfall 7). Die Modellierung dieser Maßnahmen ist im Rahmen der vorliegenden Implementierung begrenzt. Die Implementierung beschränkt sich auf die Unterbrechung des Herstellungsprozesses. Komplexes Verhalten sowie werkstückindividuelles Verhalten wird durch das integrierte Informationsmodell durch parametrisch polymorphe Klassen unterstützt, die Modellierung jedoch nicht prototypisch durch das Assistenzsystem bereitgestellt, da die attributiven Merkmale systembedingt auf Textfolgen statt auf die Abbildung von Entscheidungslogiken begrenzt sind (vgl. Testfall 8).

Grundlage der Entscheidungsbildung ist das integrierte Informationsmodell. Es spezifiziert die Datenstrukturen für die Beschreibung und Ausprägung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen in der werkstückgetriebenen Fertigung. Es stellt die dazu erforderliche semantische Repräsentation der Daten-

und Beziehungsstrukturen bereit (vgl. Testfall 9). Die semantische Verarbeitung der Repräsentation ist mit der Werkstückschablone jedoch nur für Basismerkmale, nicht aber für anwendungsbezogene Werkstückmerkmale realisiert (vgl. Testfall 10 und Testfall 11). Das integrierte Informationsmodell ist modular aufgebaut und in Kern- und Partialmodelle gegliedert. Es ist dynamisch während der Herstellungsprozesses um zusätzliche Informationsmodelle erweiterbar (vgl. Testfall 12). Für die abgebildeten Datenstrukturen stellt das Informationsmodell eine Spezifikation zur Versionierung und zur Abbildung von Privilegien bereit (vgl. Testfall 13 und Testfall 16).

Das Informationsmodell erfüllt die Anforderung an die Verknüpfung föderierter Datenbestände: Die Verwendung von URI auf Basis des REST-Programmierparadigmas erlaubt die eindeutige Identifikation granularer Informationen und somit die Aggregation föderierter Datenbestände (vgl. Testfall 14). Das verwendete Datenformat JSON bildet das in APIZ einheitlich eingesetzte Kommunikationsformat für die Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (vgl. Testfall 15). Für die Mensch-Maschine-Kommunikation wurde HTML, für die Anbindung der Fertigungsplanung SQL verwendet. Der Testfall wurde daher nur teilweise erfüllt.

APIZ erfüllt die an das Assistenzsystem gestellten Anforderungen: Es stellt über die betrachteten Phasen der Werkstückentstehung eine graphische Benutzungsschnittstelle bereit (vgl. Testfall 17), die in CAD- und CAPP-Anwendungssoftware über Schnittstellen integriert ist (vgl. Testfall 18) und die Auswahl einzelner, werkstückindividueller Fertigungszustände erlaubt (vgl. Testfall 19). APIZ ermöglicht zudem die Anzeige der werkstückindividuellen Fertigungszustände durch Rückverfolgung der Werkstückhistorie (vgl. Testfall 20) sowie die Anzeige einer Verteilungskurve für den Vergleich mehrerer Werkstücke (vgl. Testfall 21).

Tabelle 6.4: Überblick über die Anforderungserfüllung
in Anlehnung an die Testfälle aus Tabelle 3.1

Nr.	Testfall	Erfüllungsgrad
Anforderungen an die Methode		
1	Kennzeichnung von Merkmalen im 3D-Produktmodell	●
2	Identifikation von Merkmalen im 3D-Produktmodell	●
3	1:1-Zuordnung von Merkmalen zu Fertigungsprozessen	●
4	Abbildung von werkstückindividuellen Informationen	●
5	1:1-Zuordnung von werkstückindividuellen Informationen	●
6	1:1-Vergleich von Fertigungszuständen	●
7	Aggregieren des hinterlegten Werkstückverhaltens	◐
8	Auslösen des hinterlegten Werkstückverhaltens	◐
Anforderungen an das Informationsmodell		
9	Abbildung der Daten- und Beziehungsstrukturen	●
10	Semantische Verarbeitung der Beziehungsstruktur	◐
11	Schema für den algorithmisierten Vergleich	●
12	Modulare Erweiterbarkeit um Partialmodelle	●
13	Spezifikation zur Versionierung einzelner Datenstrukturen	●
14	Verknüpfung der föderierten Datenbestände	●
15	Verwendung genau eines Kommunikationsformats	◐
16	Spezifikation von Privilegien für einzelne Datenstrukturen	●

Fortsetzung auf der nächsten Seite...

6 Validierung des Konzepts

Fortsetzung von vorheriger Seite...

Nr.	Testfall	Erfüllungsgrad
Anforderungen an das Assistenzsystem		
17	Benutzungsschnittstelle über den Produktlebenszyklus	●
18	Schnittstelle für die Integration von Anwendungssoftware	●
19	Präsentation von einzelnen Werkstückzuständen	●
20	Anzeige realisierter Fertigungszustände	●
21	Anzeige der Verteilung realisierter Fertigungszustände	●

Legende:

- = Testfall vollständig erfüllt
- ◐ = Testfall teilweise erfüllt

Ausblick

Aus dem Stand der Forschung, der Konzeptionierung sowie im Rahmen der Überprüfung der Tragfähigkeit des Konzepts sind im Kontext der werkstückgetriebenen Fertigung weitere wissenschaftliche Fragestellungen hinsichtlich der virtuellen Produktentstehung entstanden, die Anlass zu weiterführender Forschung geben. Im vorliegenden Kapitel wird ein Ausblick auf diese Forschungspotenziale gegeben.

Werkstücke als Informationsträger benötigen neue Methoden zur virtuellen Produktentwicklung. Die Simulation der Interaktion verschiedener Werkstücke als Informationsträger ist wissenschaftlich nicht vollständig durchdrungen. Das Verhalten einzelner Werkstücke in der Fertigung, das in der vorliegenden Dissertation in vereinfachter Darstellung in den Attributen von PMI abgebildet worden ist (vgl. Kapitel 4.2.3 und Kapitel 5.3.1), kann derzeit weder im CAD noch in den Simulationswerkzeugen der digitalen Fabrik vollständig beschrieben werden. Das Kommunikationsverhalten muss jedoch als integraler Bestandteil der Werkstücke begriffen werden, da es die Reihenfolge und die Prozessparameter der einzelnen Arbeitsvorgänge des Ablaufarbeitsplans beeinflussen kann. ANDERL ET AL. [11], ANDERL ET AL. [12] und NATTERMANN [95] führen zwar mit dem Smart Engineering und dem W-Modell erste Ansätze für solche Produktentwicklungsmethodiken ein. Sie fassen jedoch die Systemgrenzen für die Modellierung des Kommunikationsverhaltens von Werkstücken als Informationsträger zu eng. Das vollständige Verhalten des Werkstücks ergibt sich erst aus der Betrachtung im Gesamtkontext des Fertigungssystems.

Weiterer Forschungsbedarf besteht hinsichtlich des Einflusses der Vernetzung von Werkstücken als Informationsträger und ihrer Fertigungsumgebung auf

den individuellen Herstellungsprozess. Werkstücke stehen in Wechselwirkung mit anderen Werkstücken und mit den Fertigungsressourcen: Einerseits bestehen Wechselwirkungen zwischen mehreren Werkstücken beispielsweise bei Priorisierung für die Abarbeitung von Fertigungsaufträgen. Andererseits bestehen Wechselwirkungen zwischen Werkstücken und Fertigungsressourcen beispielsweise bei der Aushandlung von Qualitätsmerkmalen. Beide Arten von Wechselwirkungen sind derzeit nicht untersucht. Informationstechnisch führen sie zu individuellen Entscheidungspfaden und damit zu werkstückindividuellen Fertigungszuständen entlang des Ablaufarbeitsplans. Die Definition einer sequentiellen Abfolge von Arbeitsvorgängen im Ablaufarbeitsplan, wie in der vorliegenden Dissertation angenommen, wandelt sich dadurch zu einem Netz aus Arbeitsvorgängen. Die entsprechende Ausprägung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen muss daran adaptiert werden. Deren vollständige Integration in die werkstückgetriebene Fertigung und damit die eigenständige Steuerung der Fertigungsprozesse durch die Werkstücke kann in diesem Zusammenhang ebenfalls betrachtet werden.

Durch die Anreicherung von Werkstücken als Informationsträger mit werkstückindividuellen Fertigungszuständen bedarf es hinsichtlich der informationstechnischen Sicherheit ergänzende wissenschaftliche Untersuchungen. Sensible Werkstückinformationen müssen im Hinblick auf ihre Herkunft, die Verantwortlichkeit für die Informationen und die Besitzansprüche gesichert werden. Ansätze zum präventiven digitalen Informationsrechtmanagement beispielsweise zur Wissensreduktion, zum Wissensschutz sowie zum Schutz vor unbeabsichtigten Wissensabfluss müssen bei der integrierten Informationsverarbeitung von Werkstücken als Informationsträger berücksichtigt werden (vgl. [10, 49, 106]).

Im Hinblick auf die langfristige Nutzung des integrierten Werkstückinformationsmodells spielt die langfristige Verfügbarkeit der Werkstückinformationen eine bedeutende Rolle. Aufgrund der Langlebigkeit einzelner Werkstücke muss trotz der kurzen Softwareentwicklungszyklen, auch in Zukunft die semantische Verarbeitung des integrierten Werkstückinforma-

tionsmodells gewährleistet sein. Die Langzeitarchivierung des integrierten Werkstückinformationsmodells gilt es in diesem Zusammenhang zu untersuchen (vgl. [105, 125]).

7 *Ausblick*

Zusammenfassung

In der Vision der werkstückgetriebenen Fertigung steuern Werkstücke als Informationsträger auf Grundlage digitaler Entscheidungsmodelle eigenständig ihre individuellen Fertigungsprozesse. Die vorliegende Dissertation liefert die informationstechnischen Grundlagen für diese digitalen Entscheidungsmodelle. Sie beschreibt die informationstechnischen Methoden und Werkzeuge zur Modellierung und Ausprägung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen im integrierten Werkstückinformationsmodell. Mit dem integrierten Werkstückinformationsmodell können realisierte, werkstückindividuelle Fertigungszustände mit geplanten Fertigungszuständen informationstechnisch verknüpft und durchgängig in den Informationsprozessen, von der virtuellen Produktentwicklung bis zur werkstückgetriebenen Fertigung, verwendet werden. Die Nutzung des integrierten Werkstückinformationsmodells erlaubt somit realisierte, werkstückindividuelle Fertigungszustände hinsichtlich geplanter Qualitätsmerkmale algorithmisiert zu verarbeiten, um dem Werker in der Fertigung Entscheidungshilfen für die Durchführung nachgelagerter Arbeitsvorgänge der werkstückindividuellen Herstellung bereitzustellen.

Die Entwicklung des Konzepts gliedert sich in zwei wesentliche Bereiche. Zum einen wird die Methode zur Modellierung und zur Ausprägung der werkstückindividuellen Fertigungszustände auf Basis der Werkstückschablone erarbeitet. Zum anderen wird die zugrunde liegende Spezifikation der digitalen Repräsentation des integrierten Werkstückinformationsmodells dargestellt.

Die Methode zur durchgängigen Modellierung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen beschreibt die Ableitung von gekennzeichneten Referenzmerkmalen in die Werkstückschablone. Merkmale und Eigenschaften aus der

8 Zusammenfassung

topologisch-geometrischen Struktur des 3D-Produktmodells werden dazu über semantische Annotationen gekennzeichnet. Diese Annotationen werden im Ablaufarbeitsplan mit den Arbeitsvorgängen zu geplanten Fertigungszuständen verknüpft. Die Abfolge aller geplanten Fertigungszustände bildet die Werkstückschablone. Die Werkstückschablone definiert die in jedem Arbeitsvorgang erforderlichen Datenstrukturen, um den realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszustand und den geplanten Fertigungszustand informationstechnisch zu vergleichen. In der Fertigung wird die Werkstückschablone werkstückindividuell in der Verwaltungs-Schale des jeweiligen Werkstücks durch algorithmisierte Verfahren ausgewertet. Die Qualitätsmerkmale des geplanten Fertigungszustands werden dazu über REST-Webdienste aus den verteilten Datenbeständen der virtuellen Produktentwicklung geladen und mit den Merkmalen des realisierten, werkstückindividuellen Fertigungszustands verglichen. Die Auswertung wird dem Werker in der werkstückgetriebenen Fertigung als Entscheidungsgrundlage für die Steuerung nachgelagerter Fertigungsprozesse bereitgestellt.

Zur Validierung der Tragfähigkeit des Konzepts ist das System zur Ausprägung von Werkstücken als Informationsträger (APIZ) entwickelt und prototypisch implementiert worden. APIZ verknüpft Werkstücke als Informationsträger über internetbasierte Webdienste mit dem 3D-CAD-Autorensystem NX und dem Ablaufarbeitsplan.

Im Rahmen der Validierung wurden die Tragfähigkeit des Konzepts und seine praktische Anwendbarkeit für 126 repräsentative Werkstücke nachgewiesen. APIZ wurde dazu in der virtuellen Produktentstehung einer prototypischen werkstückgetriebenen Fertigung angewandt. Bei der Fertigung werden die durch Messmittel erfassten Werkstückinformationen über PMI mit dem verknüpften 3D-CAD-Modell der Werkstücke verglichen. Liegen die Werkstückmerkmale außerhalb der in der Produktdefinition modellierten Toleranzangaben, erkennt das Werkstück diese Abweichung und lässt den Herstellungsprozess des Werkstücks vom Werker unterbrechen.

Die in der vorliegenden Dissertation vorgestellten informationstechnischen Strukturen und Methoden können über den betrachteten Validierungskontext hinaus auch für andere Produktentstehungsprozesse angewandt werden. Besonderes Forschungspotential verspricht der Einsatz von Bauteilen als Informationsträger in verzweigten Produktionsprozessen. Diese können nicht durch sequentielle Ablaufarbeitspläne abgebildet werden, die Nutzung des Konzepts erlaubt trotzdem die Auswertung der Fertigungszustände.

Das in der vorliegenden Dissertation entwickelte Konzept stellt einen Ansatz für die Modellierung und die Ausprägung werkstückindividueller Fertigungszuständen dar. Eine industrielle Implementierung des integrierten Werkstückinformationsmodells zur Ausprägung von werkstückindividuellen Fertigungszuständen kann den Wandel von der auftragsgetriebenen Fertigung in die werkstückgetriebene Fertigung unterstützen.

8 Zusammenfassung

Literaturverzeichnis

- [1] ABELE, E. ; HADDADIAN, K. ; BAIER, C. ; KLOOS, K. : Geometrieerfassung komplexer Bauteile mit Laserliniensensoren. In: *wt Werkstatttechnik online* 6 (2015), Nr. 105, S. 390–394
- [2] ABELE, E. ; SAUER, M. : Maschinenbau: Näher am Kunden mit Industrie 4.0 Ansätzen. In: *Maschinenbau und Metallbearbeitung* (2014), S. 10–12. – ISSN 1614-242X
- [3] ABELN, O. (Hrsg.): *CAD – Referenzmodell*. Stuttgart : B. G. Teubner, 1995. – ISBN 3–519–06356–5
- [4] ABRAMOVICI, M. (Hrsg.) ; STARK, R. (Hrsg.): *Lecture Notes in Production Engineering*. Bd. 5: *Smart Product Engineering*. Springer, 2013. – ISBN 978–3–642–30816–1
- [5] ACATECH (Hrsg.): *Cyber-Physical Systems: Innovationsmotor für Mobilität, Gesundheit, Energie und Produktion*. acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2011. – ISBN 978–3–642–27566–1
- [6] ACATECH - DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN (Hrsg.): *Smart Service Welt – Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Internetbasierte Dienste für die Wirtschaft*. Berlin : acatech, 2014
- [7] AHMAD, N. ; HAQUE, A. ; HASIN, A. A.: Current Trend in Computer Aided Process Planning. In: *Proceedings of the 7th Annual Paper Meet and 2nd International Conference*, 2001
- [8] ANDERL, R. ; STRANG, D. ; PICARD, A. ; CHRIST, A. : Integriertes Bauteildatenmodell für Industrie 4.0: Informationsträger für cyber-physische Produktionssysteme. In: *ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 1–2 (2014), Nr. 109, S. 64–69. – ISSN 0947–0085

- [9] ANDERL, R. : *Fertigungsplanung durch die Simulation von Arbeitsplänen auf der Basis von 3-D Produktmodellen*. Bd. Nr. 40. VDI-Verlag, 1985. – ISBN 3-18-144010-8
- [10] ANDERL, R. : *Industrie 4.0 – Technological Approaches, Use Cases, and Implementation*. In: *at – Automatisierungstechnik 2015* (2015)
- [11] ANDERL, R. (Hrsg.) ; EIGNER, M. (Hrsg.) ; SENDLER, U. (Hrsg.) ; STARK, R. (Hrsg.): *Smart Engineering: Interdisziplinäre Produktentstehung*. Berlin, Heidelberg (DE) : acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2012 (acatech DISKUSSION). – ISBN 978-3-642-29371-9
- [12] ANDERL, R. ; PICARD, A. ; ALBRECHT, K. : *Smart Engineering for Smart Products*. In: ABRAMOVICI, M. (Hrsg.) ; STARK, R. (Hrsg.): *Smart Product Engineering* Bd. 5. Berlin, Heidelberg (DE) : Springer, 2013. – ISBN 978-3-642-30816-1, S. 1-10
- [13] ANDERL, R. ; REZAEI, M. : *Federative Factory Data Management – An Approach based upon Service Oriented Architecture*. In: *Digital Enterprise Technology – Perspectives and Future Challenges*, Springer Science+Business Media, 2007. – ISBN 978-0-387-49863-8, S. 67-74
- [14] ANDERL, R. ; ROLLMANN, T. ; VÖLZ, D. ; NATTERMANN, R. ; MALTZAHN, S. ; MOSCH, C. : *Virtuelle Produktentstehung*. In: RIEG, F. (Hrsg.) ; STEINHILPER, R. (Hrsg.): *Handbuch Konstruktion*. München : Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2012. – ISBN 978-3-446-43000-6, S. 925-938
- [15] ANDERL, R. ; TRIPPNER, D. : *STEP: Standard for the Exchange of Product Model Data. Eine Einführung in die Entwicklung, Implementierung und industrielle Nutzung der Normenreihe ISO 10303 (STEP)*. Stuttgart, Leipzig (DE) : B. G. Teubner, 2000. – ISBN 3-519-06377-8
- [16] AWISZUS, B. : *Integrierte Produkt- und Prozeßmodellierung umformtechnischer Planungsprozesse*. Aachen : Shaker Verlag, 2000 (Berichte aus dem Maschi-

- nenbau). – ISBN 3–8265–7852–X. – Zugl.: Hannover, Univ., Habil.-Schr., 2000
- [17] BAUERNHANSL, T. (Hrsg.) ; HOMPEL, M. ten (Hrsg.) ; VOGEL-HEUSER, B. (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Wiesbaden : Springer Fachmedien, 2014. – ISBN 978–3–658–04681–1
- [18] BENES, G. M. E. ; GROH, P. : *Grundlagen des Qualitätsmanagements*. Carl Hanser Verlag, 2014 (3., aktualisierte Auflage). – ISBN 978–3–446–44223–8
- [19] BENGEL, M. : *Workpiece-centered Approach to Reconfiguration in Manufacturing Engineering*. Heimsheim : Jost-Jetter Verlag, 2010 (Berichte aus dem Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen der Universität Stuttgart und dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA 175). – ISBN 978–3–939890–60–7. – Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2010
- [20] BERNSTEIN, H. : *Grundlagen der Mechatronik*. Berlin : VDE-Verlag, 2000 (EDV-Praxis). – ISBN 3800724529
- [21] BOOCH, G. ; RUMBAUGH, J. ; JACOBSON, I. : *Das UML Benutzerhandbuch – Aktuell zur Version 2.0*. München : Addison-Wesley Verlag, 2006. – ISBN 978–3–8273–2295–1
- [22] BOSSMANN, M. ; BLEY, H. (Hrsg.) ; WEBER, C. (Hrsg.): *Feature-basierte Produkt- und Prozessmodelle in der integrierten Produktentstehung*. Saarbrücken : Universität des Saarlandes, 2007 (Schriftenreihe Produktionstechnik 38). – Zugl.: Darmstadt, Univ. des Saarlands, Diss., 2007
- [23] BRAUN, M. ; HACKSTEIN, R. (Hrsg.): *Beitrag zur technisch-organisatorischen Gestaltung von Koppelungen zwischen CAD- und PPS-Systemen in Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus*. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 1990 (Berichte aus dem Forschungsinstitut für Rationalisierung (FIR) und

- dem Lehrstuhl und Institut für Arbeitswissenschaft (IAW)). – ISBN 3–540–52492–4. – Zugl.: Aachen, Rhein.-Westf. Techn. Hochschule, Diss., 1989
- [24] BROY, M. : Cyber-Physical Systems: Wissenschaftliche Herausforderungen bei der Entwicklung. In: BROY, M. (Hrsg.): *Cyber-Physical Systems: Innovation durch Softwareintensive eingebettete Systeme*. München (DE) : acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2010 (acatech DISKUTIERT). – ISBN 978–3–642–14498–1, S. 17–31
- [25] BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG (Hrsg.): *Zukunftsbild „Industrie 4.0“*. Bonn : Bundesministerium für Bildung und Forschung, Referat IT-Systeme, 2014
- [26] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (Hrsg.): *AUTONOMIK für Industrie 4.0*. Berlin : Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2012
- [27] COLOMBO, A. W. ; KARNOUSKOS, S. ; BANGEMANN, T. : Towards the Next Generation of Industrial Cyber-Physical Systems. In: COLOMBO, A. W. (Hrsg.) ; BANGEMANN, T. (Hrsg.) ; KARNOUSKOS, S. (Hrsg.) ; DELSING, J. (Hrsg.) ; STLUKA, P. (Hrsg.) ; HARRISON, R. (Hrsg.) ; JAMMES, F. (Hrsg.) ; LASTRA, J. L. M. (Hrsg.): *Industrial Cloud-Based Cyber-Physical Systems – The IMC-AESOP Approach*. Heidelberg : Springer International Publishing, 2014. – ISBN 978–3–319–05623–4, S. 1–22
- [28] CULLER, D. E. ; BURD, W. : A framework for extending computer aided process planning to include business activities and computer aided design and manufacturing (CAD/CAM) data retrieval. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* Bd. 23, 2007, S. 339–350
- [29] DENKENA, B. ; AMMERMANN, C. : CA-Technologien in der Fertigungs- und Prozessplanung. In: *ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 4 (2009), Nr. 104, S. 300–305

- [30] DENKENA, B. ; ANDRES, S. ; HENNING, H. : Bauteilinhärente Informationsspeicherung –Potenziale für die Produktivitätssteigerung. In: *Productivity Management* 5 (2011), Nr. 16, S. 32–35
- [31] DENKENA, B. ; BOUJNAH, H. ; HENNING, H. ; MÖRKE, T. ; SCHMIDT, J. ; MEYER, J. : Anwendungspotentiale gentelligenter Bauteile – Vorteile einer bauteilinhärenten Informationsspeicherung in der Fertigung. In: *wt Werkstatttechnik online* 2 (2013), Nr. 103, S. 152–156
- [32] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V: *Technische Zeichnungen – Maßeintragung – Begriffe, allgemeine Grundlagen*. Berlin : DIN 406-10: Beuth Verlag GmbH, Dez. 1992
- [33] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V: *Technische Zeichnungen – Maßeintragung – Grundlagen der Anwendung*. Berlin : DIN 406-11: Beuth Verlag GmbH, Dez. 1992
- [34] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V: *Dokumentationssystematik – Teil 5: Freigabe in der Technischen Produktdokumentation*. Berlin : DIN 6789 Teil 5: Beuth Verlag GmbH, Okt. 1995
- [35] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V: *Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik – Merkmalsbezogene Begriffe*. Berlin : DIN 55350 Teil 12: Beuth Verlag GmbH, März 1999
- [36] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V: *Technische Produktdokumentation – Lebenszyklusmodell und Zuordnung von Dokumenten*. Berlin : DIN ISO 15226: Beuth Verlag GmbH, Okt. 1999
- [37] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Angabe der Oberflächenbeschaffenheit in der technischen Produktdokumentation*. Berlin : DIN EN ISO 1302: Beuth Verlag GmbH, Jun. 2002

Literaturverzeichnis

- [38] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V: *Technische Produktdokumentation – CAD-Modelle, Zeichnungen und Stücklisten – Teil 1: Begriffe*. Berlin : DIN 199-1: Beuth Verlag GmbH, März 2002
- [39] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V: *Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung*. Berlin : DIN 8580: Beuth Verlag GmbH, Sept. 2003
- [40] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V: *Fertigungsverfahren Spanen – Teil 0: Allgemeines Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Berlin : DIN 8589-0: Beuth Verlag GmbH, Sept. 2003
- [41] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V: *Technische Produktdokumentation – Dokumentenmanagement*. Berlin : DIN EN ISO 11442: Beuth Verlag GmbH, Jun. 2006
- [42] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V: *Technische Produktdokumentation – Verfahren für digitale Produktdefinitionsdaten*. Berlin : DIN EN ISO 16792: Beuth Verlag GmbH, Dez. 2008
- [43] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – ISO-Toleranzsystem für Längenmaße – Teil 1: Grundlagen für Toleranzen, Abmaße und Passungen*. Berlin : DIN EN ISO 286-1: Beuth Verlag GmbH, Nov. 2010
- [44] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V: *Technische Produktdokumentation – Dreidimensionale CAD-Modelle – Teil 3: Funktionselemente*. Berlin : DIN 32869-3: Beuth Verlag GmbH, Jun. 2012
- [45] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V: *Technische Produktdokumentation – Vokabular – Begriffe für technische Zeichnungen, Produktdefinition und verwandte Dokumentation*. Berlin : DIN EN ISO 10209: Beuth Verlag GmbH, Nov. 2012

- [46] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrische Tolerierung – Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf*. Berlin : DIN EN ISO 1101: Beuth Verlag GmbH, Apr. 2014
- [47] EHRENSPIEL, K. ; MEERKAMM, H. : *Integrierte Produktentwicklung : Denkbahläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. 5., überarbeitete und erw. Aufl. München : Hanser, 2013. – ISBN 978-3-446-43548-3
- [48] EIGNER, M. ; GERHARDT, F. ; GILZ, T. ; NEM, F. M.: *Informationstechnologie für Ingenieure*. Berlin, Heidelberg (DE) : Springer-Verlag, 2012. – ISBN 978-3-642-24892-4
- [49] EIGNER, M. ; STELZER, R. : *Product Lifecycle Management . Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management*. 2., neu bearbeitete Auflage. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2009. – ISBN 978-3-540-44373-5
- [50] EVERSHEIM, W. : *Organisation in der Produktionstechnik: Arbeitsvorbereitung*. 4., bearbeitete und korrigierte Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2002. – ISBN 3-540-42016-9
- [51] FAVRE-BULL, B. ; ZOITL, A. : Adaptive Produktionssysteme. In: *Productivity Management 2* (2006), Nr. 22, S. 45–48
- [52] FIELDING, R. T.: *Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures*, University of California, Diss., 2000
- [53] FISCHER, U. ; GOMERINGER, R. ; HEINZLER, M. ; KILGUS, R. ; NÄHER, F. ; OESTERLE, S. ; PAETZOLD, H. ; STEPHAN, A. : *Tabellenbuch Metall*. 45. Auflage. Nourney : Verlag Europa-Lehrmittel, 2011. – ISBN 978-3-8085-1725-3
- [54] FREUND, J. ; RÜCKER, B. : *Praxishandbuch BPMN 2.0*. 3. Carl Hanser Verlag, 2012. – ISBN 978-3-446-42986-4
- [55] FRIEDENTHAL, S. ; MOORE, A. ; STEINER, R. : *A Practical Guide to SysML: The Systems Modeling Language*. 2. Auflage. Waltham (US) : Elsevier Inc., 2012. – ISBN 978-0-12-385206-9

- [56] GAUSEMEIER, J. ; HAHN, A. ; KESPOHL, H. D. ; SEIFERT, L. : *Vernetzte Produktentwicklung – Der erfolgreiche Weg zum Global Engineering Network*. München, Berlin : Carl Hanser Verlag, 2006. – ISBN 978-3-446-22725-5
- [57] GAUSEMEIER, J. ; PLASS, C. : *Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung – Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen*. 2., überarbeitete Auflage. München : Carl Hanser Verlag, 2014. – ISBN 978-3-446-43631-2
- [58] GEISBERGER, E. (Hrsg.) ; BROY, M. (Hrsg.): *agendaCPS. Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems*. acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2012
- [59] GILSDORF, E. : *Objektmodell zur Modellierung sicherheitsrelevanter Informationen für technische Produkte*. Aachen : Shaker, 2012 (Forschungsberichte aus dem Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion 42). – ISBN 978-3-8440-1211-8. – Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2001
- [60] GORECKI, P. ; PAUTSCH, P. : *Praxisbuch Lean Management – Der Weg zur operativen Excellence*. München : Carl Hanser Verlag, 2013. – ISBN 978-3-446-43311-3
- [61] GRABOWSKI, H. ; ANDERL, R. : *Produktdatenaustausch und CAD-Normteile: für Konstruktionsleiter, Normstellenleiter, CAD-Projektleiter, DV-Leiter*. Böblingen : expert Verlag, 1990. – ISBN 3-8169-0606-0
- [62] GRABOWSKI, H. ; ANDERL, R. ; POLLY, A. ; WARNECKE, H.-J. (Hrsg.) ; SCHUSTER, R. (Hrsg.) ; DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (Hrsg.): *Integriertes Produktmodell*. 1. Aufl. Berlin, Wien, Zürich : DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 1993. – ISBN 3-410-12920-0
- [63] GROTE, K.-H. (Hrsg.) ; FELDHUSEN, J. (Hrsg.): *Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau*. 22., neubearbeitete und erweiterte. Berlin, Heidelberg, New York : Springer-Verlag, 2007. – ISBN 978-3-540-49714-1

- [64] HAFNER, M. ; BREU, R. : *Security Engineering for Service-Oriented Architectures*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2009. – ISBN 978-3-540-79538-4
- [65] HAUPERT, J. : *DOMeMan : Repräsentation, Verwaltung und Nutzung von digitalen Objektgedächtnissen*. Saarbrücken : Saarländische Universitäts- und Landesbibliothek, 2013. – Zugl.: Saarbrücken, Universität des Saarlandes, Diss., 2013
- [66] HEHENBERGER, P. : *Computerunterstützte Fertigung – Eine kompakte Einführung*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2011. – ISBN 978-3-642-13474-6
- [67] HERING, E. ; TRIEMEL, J. ; BLANK, H.-P. : *Qualitätsmanagement für Ingenieure*. 4., überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 1999. – ISBN 3-540-65092-X
- [68] HERLYN, W. : *PPS im Automobilbau – Produktionsprogrammplanung und -steuerung von Fahrzeugen und Aggregaten*. München : Carl Hanser Verlag, 2012. – ISBN 978-3-446-41370-2
- [69] HEUTSCHI, R. : *Serviceorientierte Architektur – Architekturprinzipien und Umsetzung in die Praxis*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2007. – ISBN 978-3-540-72357-8
- [70] HORN, S. ; CLANS, A. ; NEIDIG, J. ; KIESEL, B. ; HANSEN, T. ; HAUPERT, J. : The SEMPROM Data Format. In: WAHLSTER, W. (Hrsg.): *SemProM: Foundations of Semantic Product Memories for the Internet of Things*. Berlin (DE) : Springer, 2013. – ISBN 978-3-642-37376-3, S. 127-148
- [71] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: *Industrial automation systems and integration – Product data representation and exchange – Part 214: Application Protocol: Core data for automotive mechanical design processes*. Schweiz (CH) : ISO-Norm 10303-214, 2003
- [72] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: *Industrial automation systems and integration – Product data representation and exchange – Part*

- 111: *Integrated application resource: Elements for the procedural modelling of solid shapes*. Schweiz (CH) : ISO-Norm 10303-111, Mai 2007
- [73] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: *Industrial automation systems and integration – Product data representation and exchange – Part 239: Application Protocol: Product Life Cycle Support*. Schweiz (CH) : ISO-Norm 10303-239, 2010
- [74] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: *Industrial automation systems and integration – Product data representation and exchange – Part 242: Application protocol: Managed model-based 3D engineering*. Schweiz (CH) : ISO-Norm 10303-242, 2013
- [75] KAGERMANN, H. ; WAHLSTER, W. ; HELBIG, J. : *Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern: Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0: Abschlussbereich des Arbeitskreises Industrie 4.0*. Frankfurt (DE) : acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V., 2013
- [76] KAMRANI, A. K. ; SFERRO, P. ; HANDELMAN, J. : Critical Issues in Design and Evaluation of Computer Aided Process Planing Systems. In: *Proceedings of the 17th International Conference on Computers and Industrial Engineering* Bd. 29. Miami, Florida : Elsevier Science Ltd., Sept. 1995, S. 619–623
- [77] KÖHLER-SCHULTE, C. (Hrsg.): *Industrie 4.0: Ein praxisorientierter Ansatz*. Berlin : KS-Energy-Verlag, 2015. – ISBN 978–3–945622–01–8
- [78] KIEF, H. B.: *NC/CNC-Handbuch*. Auflage 2005/2006. München, Wien : Carl Hanser Verlag, 2005. – ISBN 3–446–40039–7
- [79] KLETTI, J. (Hrsg.): *MES Manufacturing Execution System – Moderne Informationstechnologie zur Prozessfähigkeit der Wertschöpfung*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2006. – ISBN 978–3–540–28010–1
- [80] KLETTI, J. : Industrie 4.0: MES ermöglicht Dezentralisierung. In: *Productivity Management* 2 (2015), Nr. 20, S. 15–17

- [81] KRASTEL, M. : *Integration multidisziplinärer Simulations- und Berechnungsmodelle in PDM-Systeme*. Aachen : Shaker, 2002 (Forschungsberichte aus dem Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion 11). – ISBN 978-3-83220281-1. – Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2002
- [82] KRAUSE, F. L. ; CIESLA, M. ; RIEGER, E. ; STEPHAN, M. ; ULBRICH, A. : Features als semantische Objekte. In: *CAD/CAM Report*, 1994, S. 80–91
- [83] LEE, C. ; LEEM, C. S. ; HWANG, I. : PDM and ERP integration methodology using digital manufacturing to support global manufacturing. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. London : Springer-Verlag, 2011, S. 399–409
- [84] LEE, E. A.: Cyber Physical Systems: Design Challenges. In: *Technical Report UCB/EECS-2008-8*. Berkeley (US) : EECS Department, University of California, Jan. 2008, S. 1–8
- [85] LEE, E. A.: CPS foundations. In: *Design Automation Conference (DAC), 2010 47th ACM/IEEE*, 2010. – ISSN 0738-100X, S. 737–742
- [86] LEE, E. A. ; SESHIA, S. A.: *Introduction to Embedded Systems - A Cyber-Physical Systems Approach*. First Edition. LeeSeshia.org, 2011. – ISBN 978-0-557-70857-4
- [87] LUCKE, D. : Smart Factory. In: WESTKÄMPER, E. (Hrsg.) ; SPATH, D. (Hrsg.) ; CONSTANTINESCU, C. (Hrsg.) ; LENTES, J. (Hrsg.): *Digitale Produktion*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2013. – ISBN 978-3-642-20258-2, S. 251–269
- [88] MASSÉ, M. : *REST API Design Rulebook*. Sebastopol, CA, USA : O'Reilly Media, Inc., 2012. – ISBN 978-1-449-31050-9
- [89] MELZER, I. (Hrsg.): *Service-orientierte Architekturen mit Web Services – Konzepte – Standards – Praxis*. 4. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, 2010. – ISBN 978-3-8274-2549-2

- [90] MILBERG, J. : Wettbewerbsvorteile durch Integration in Produktionsunternehmen. In: *Referate des Münchener Kolloquiums '88*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 24./25. März 1988 1988 (iwb Münchener Kolloquium). – ISBN 978-3-540-19033-2
- [91] MING, X. ; K.L.MAK; ; YAN, J. : A PDES/STEP-based information model for computer-aided process planning. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* Bd. 14, 1998, S. 347–361
- [92] MONTAU, R. : *Föderatives Produktdatenmanagement anhand semantischer Informationsmodellierung*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1996 (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 20 – Rechnerunterstützte Verfahren Nr. 213). – ISBN 3-18-321320-6
- [93] MOSCH, C. : *Fertigungsprozessorientiertes Simultaneous Engineering basierend auf 3-D Werkstückmodellen*. Aachen : Shaker, 2014 (Forschungsberichte aus dem Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion). – ISBN 978-3-8440-2544-6. – Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2013
- [94] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY: *Integration Definition for Function Modeling (IDEF0)*. Draft Federal Information Processing Standards Publication 183, 1993
- [95] NATTERMANN, R. : *Integrierte, virtuelle Entwicklung adaptronischer Systeme*. Aachen : Shaker, 2014 (Forschungsberichte aus dem Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion). – ISBN 978-3-8440-2735-8. – Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2014
- [96] NYHUIS, P. ; FISSER, F. ; SCHMIDT, M. : Bauteile als Informationsträger verändern zukünftige Fabriken. In: *Industrie Management* Bd. 22, GITO-Verlag, 2006, S. 19–22
- [97] NYHUIS, P. ; SCHULZE, C. P. ; HARTMANN, W. ; SCHMIDT, M. ; HERDE, F. : Bauteilgetriebene Montagesteuerung und Fabrikstrukturierung durch

- Nutzung Gentelligenter Technologie. In: *Industrie Management* Bd. 2, GITO-Verlag, 2009, S. 13–16
- [98] OBJECT MANAGEMENT GROUP, INC.: *OMG Unified Modeling Language™ (OMG UML), Infrastructure*. 2010. – Version 2.3
- [99] OESTEREICH, B. ; SCHEITHAUER, A. : *Analyse und Design mit der UML 2.5: Objektorientierte Softwareentwicklung*. 11., umfassend überarbeitete und aktualisierte Auflage. München (DE) : Oldenbourg Verlag, 2013. – ISBN 978-3-486-72140-9
- [100] PHAM-VAN, T.-N. : *Föderatives PDM zur Verwaltung mechatronischer Systemstrukturen*. Aachen : Shaker, 2007 (Forschungsberichte aus dem Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion 25). – ISBN 978-3-8322-5785-9. – Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2006
- [101] PICARD, A. ; ANDERL, R. : Integrated Component Data Model for Smart Production Planning. In: SCHÜTZER, K. (Hrsg.): *Anais do 19º Seminário Internacional de Alta Tecnologia*. Santa Bárbara d'Oeste (BR) : Laboratory for Computer Application in Design and Manufacturing, Methodist University of Piracicaba, 2014, S. 58–79. – ISSN 2175-9960
- [102] PICARD, A. ; ANDERL, R. ; SCHÜTZER, K. : Controlling Smart Production Processes Using RESTful Web Services and Federative Factory Data Management. In: *Proceedings of the Asia Pacific Industrial Engineering and Management System (APIEMS)*, 2013
- [103] PICARD, A. ; ANDERL, R. ; SCHÜTZER, K. ; ASSIS MOURA, A. A.: Linked Product And Process Monitoring in Smart Factories Based On Federative Factory Data Management. In: *Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress & Exposition (IMECE)*, 2013
- [104] PLATTFORM INDUSTRIE 4.0: *Umsetzungsstrategie Industrie 4.0 – Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0*. BITKOM e.V., VDMA e.V., ZVEI e.V., 2015

- [105] PROJECT LOTAR (Hrsg.): *Long Term Archiving and Retrieval of Product Data within the Aerospace Industry (LOTAR) – Technical Aspects of an approach for application*. Whitepaper. Darmstadt : ProSTEP iViP Association, 2002
- [106] PROSTEP iViP ASSOCIATION (Hrsg.): *Secure Product Creation Processes (SP²) – Sichere Datenaustauschprozesse in der unternehmensübergreifenden Produktentwicklung*. Whitepaper. Darmstadt : ProSTEP iViP Association, 2008
- [107] QUENTIN, H. : *Statistische Prozessregelung – SPC*. München : Carl Hanser Verlag, 2008. – ISBN 978-3-446-41637-6
- [108] REFA – VERBAND FÜR ARBEITSGESTALTUNG, BETRIEBSORGANISATION UND UNTERNEHMENSENTWICKLUNG: *Ausgewählte Methoden der Planung und Steuerung*. 1. München : REFA – Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V., 1993. – ISBN 3-446-17704-3
- [109] REZAEI, M. : *Konzeption eines Fabrikinformationsmanagements auf Basis von postrelationalen Datenbanken: ein Beitrag zur Unterstützung von Concurrent und Simultaneous Engineering in der integrierten Prozessgestaltung*. Aachen : Shaker, 2010 (Forschungsberichte aus dem Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion 38). – ISBN 978-3-8322-9480-9. – Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2010
- [110] RICHTER, J.-P. ; HALLER, H. ; SCHREY, P. : Serviceorientierte Architektur. In: *Informatik-Spectrum* 28 (2005), Okt., Nr. 5, S. 413–416
- [111] ROBERTSON, S. ; ROBERTSON, J. : *Mastering the Requirements Process: Getting Requirements Right*. 3. Auflage. Upper Saddle River, New Jersey (US) : Addison-Wesley, 2013. – ISBN 978-0-321-81574-3
- [112] RODDECK, W. : *Einführung in die Mechatronik*. 4., überarb. Aufl. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2012 (Studium). – ISBN 9783834816221

- [113] ROLLMANN, T. : *Simultaneous Engineering von integralen Blechbauweisen höherer Verzweigungsordnung : Ein Beitrag zur Integration von Konstruktion und Produktionsprozessplanung*. Aachen : Shaker, 2012 (Forschungsberichte aus dem Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion 40). – ISBN 978-3-8440-0786-2. – Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2011
- [114] RUPP, C. : *Requirements-Engineering und –Management: Professionelle, iterative Anforderungsanalyse für die Praxis*. 5. Auflage. München (DE), Wien (AU) : Carl Hanser Verlag, 2009. – ISBN 978-3-446-41841-7
- [115] SANZENBACHER, M. : *NC-gerechte Beschreibung von Werkstücken mit gekrümmten Flächen*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 1982 (Berichte aus dem Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen der Universität Stuttgart). – ISBN 978-3-540-11502-1
- [116] SCHEER, A.-W. ; BOCZANSKI, M. ; MUTH, M. ; SCHMITZ, W.-G. ; SEGELBACHER, U. : *Prozessorientiertes Produkt Lifecycle Management*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2006. – ISBN 978-3-540-2840-4
- [117] SCHÜLE, A. L.: *Ein technologiebasiertes Informationsmodell zur Unterstützung des Produktentstehungsprozesses verzweigter Blechbauteile*. Aachen : Shaker, 2014 (Forschungsberichte aus dem Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion). – ISBN 978-3-8440-2863-8. – Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2014
- [118] SEEMANN, J. ; GUDENBERG, J. von: *Software-Entwurf mit UML 2: Objektorientierte Modellierung mit Beispielen in Java*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg (DE) : Springer-Verlag, 2006. – ISBN 10 3-540-30949-7
- [119] SILBERBERGER, H. : *Collaborative Business und Web Services – Ein Managementleitfaden in Zeiten technologischen Wandels*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2003. – ISBN 3-540-00417-3
- [120] SOLIMAN, F. ; CLEGG, S. ; TANTOUSH, T. : Critical success factors for integration of CAD/CAM systems with ERP systems. In: *International*

- Journal of Operations & Production Management* Bd. Vol. 21, MCB University Press, 2001, S. 609–629
- [121] SPRENGER, S. : *Webbasierte Zuordnung produktbezogener Informationen zum 3D-Produktmodell*. Aachen : Shaker, 2014 (Forschungsberichte aus dem Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion). – ISBN 978-3-8440-3111-9. – Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2014
- [122] SPUR, G. ; KRAUS, F.-L. : *Das virtuelle Produkt – Management der CAD-Technik*. Wien : Carl Hanser Verlag, 1997. – ISBN 3-446-19176-3
- [123] STACHOWIAK, H. : *Allgemeine Modelltheorie*. Wien : Springer-Verlag, 1973. – ISBN 9783211811061
- [124] STARK, J. : *Product Lifecycle Management – 21st Century Paradigm for Product Realisation*. 2nd Edition. London : Springer-Verlag, 2011. – ISBN 978-0-85729-545-3
- [125] THE EUROPEAN ASSOCIATION OF AEROSPACE INDUSTRIES: *LOng Term Archiving and Retrieval of digital technical product documentation such as 3D, CAD and PDM data – Part 001: Structure*. Bruxelles, Jun. 2005
- [126] THE EUROPEAN ASSOCIATION OF AEROSPACE INDUSTRIES: *LOng Term Archiving and Retrieval of digital technical product documentation such as 3D, CAD and PDM data – Part 120: CAD 3D explicit geometry with product and manufacturing information*. Bruxelles, Jun. 2012
- [127] VAJNA, S. ; SCHLINGENSIEPEN, J. : *CIM Lexikon*. Braunschweig : Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1990. – ISBN 978-3-528-04798-6
- [128] VAJNA, S. ; WEBER, C. ; BLEY, H. ; ZEMAN, K. : *CAX für Ingenieure – Eine praxisbezogene Einführung*. 2. völlig neu bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2009. – ISBN 978-3-540-36038-4

- [129] VAJNA, S. ; WEBER, C. ; SCHLINGENSIEPEN, J. ; SCHLOTTMANN, D. : *CAD/CAM für Ingenieure: Hardware – Software – Strategien*. Braunschweig, Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 1994. – ISBN 978–3–528–06476–1
- [130] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *3-D-Produktmodellierung – Technische und organisatorische Voraussetzungen Verfahren, Werkzeuge und Anwendungen Wirtschaftlicher Einsatz in der Praxis*. Berlin : VDI-Richtlinie 2209, März 2003
- [131] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung – CAD-Benutzungsfunktionen*. Berlin : VDI-Richtlinie 2249, Sept. 2003
- [132] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung – Feature-Technologie*. Berlin : VDI-Richtlinie 2218, März 2003
- [133] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *Technische Dokumentation – Begriffsdefinitionen und rechtliche Grundlagen*. Berlin : VDI-Richtlinie 4500 Blatt 1, Jun. 2006
- [134] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *Technische Dokumentation – Organisieren und Verwalten*. Berlin : VDI-Richtlinie 4500 Blatt 2, Nov. 2006
- [135] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *Fertigungsmanagementsysteme*. Berlin : VDI-Richtlinie 5600 Blatt 1, Dez. 2007
- [136] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *Digitale Fabrik: Grundlagen*. Berlin : VDI-Richtlinie 4499 Blatt 1, Febr. 2008
- [137] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *Technische Dokumentation – Dokumentationsprozess Planen, Gestalten, Erstellen*. Berlin : VDI-Richtlinie 4500 Blatt 4, Dez. 2011

- [138] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *Fertigungsmanagementsysteme - Unterstützung von Produktionssystemen durch MES*. Berlin : VDI-Richtlinie 5600 Blatt 4, Okt. 2012
- [139] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung Einführung und Betrieb von PDM-Systemen*. Berlin : VDI-Richtlinie 2219 – Entwurf, Okt. 2014
- [140] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. ; VDI/VDE-GESELLSCHAFT MESS- UND AUTOMATISIERUNGSTECHNIK: *Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation*. 2013
- [141] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. ; VDI/VDE-GESELLSCHAFT MESS- UND AUTOMATISIERUNGSTECHNIK: *Industrie 4.0 Statusreport – Gegenstände, Entitäten, Komponenten*. 2014
- [142] VÖLZ, D. : *Semantische Annotationen zur rechnergestützten kooperativen Produktentwicklung*. Aachen : Shaker, 2011 (Forschungsberichte aus dem Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion 39). – ISBN 978–3–8440–0028–3. – Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2010
- [143] VOGEL-HEUSER, B. ; BAYRAK, G. ; FRANK, U. : *Forschungsfragen in "Produktionsautomatisierung der Zukunft"*. acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2012
- [144] WAHLSTER, W. : The Semantic Product Memory: An Interactive Black Box for Smart Objects. In: WAHLSTER, W. (Hrsg.): *SemProM: Foundations of Semantic Product Memories for the Internet of Things*. Berlin (DE) : Springer, 2013. – ISBN 978–3–642–37376–3, S. 3–21
- [145] WANNENWETSCH, H. : *Integrierte Materialwirtschaft, Logistik und Beschaffung*. 5., neu bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2014. – ISBN 978–3–462–45022–8

- [146] WEILKIENS, T. : *Systems Engineering mit SysML/UML – Modellierung, Analyse, Design*. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Heidelberg : dpunkt.verlag GmbH, 2008
- [147] WESTKÄMPER, E. ; JENDOUBI, L. : Smart Factories - Manufacturing Environments and Systems of the Future. In: *The 36th CIRP-International Seminar on Manufacturing Systems*. Saarbrücken : Universität des Saarlandes, Jun. 2003, S. 13–16
- [148] WIENEKE, F. ; SCHMIDT, J. : *Produktionsmanagement – Produktionsplanung und Auftragsabwicklung am Beispiel einer virtuellen Firma*. Bd. 4. Auflage. Nourney : Europa-Lehrmittel, 2012. – ISBN 978–3–8085–5314–5
- [149] WINTERHAGEN, J. : Automatisiert zur Losgröße 1. In: *Ampere – Industrie 4.0 – Wenn das Werkstück die Fabrik steuert* (2013), Nr. 1, S. 13–17
- [150] XU, X. ; WANG, L. ; NEWMAN, S. T.: Computer-aided process planning – A critical review of recent developments and future trends. In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* Bd. Vol. 24, Taylor & Francis, Jan. 2011, S. 1–31. – ISSN 0951-192X
- [151] ZASLAVSKY, I. : Service-Oriented Architecture. In: SHEKHAR, S. (Hrsg.) ; XIONG, H. (Hrsg.): *Encyclopedia of GIS*, SpringerScience+Business Media, 2008. – ISBN 978–0–387–35973–1, S. 1054–1055
- [152] ZENTRALVERBAND ELEKTROTECHNIK UND ELEKTRONIKINDUSTRIE E.V.: *Identifikation und Traceability in der Elektro- und Elektronikindustrie – Leitfaden für die gesamte Wertschöpfungskette*. 2009
- [153] ZIRBS, J. : Fertigungsgerechte Aufbereitung von Flächenverbänden bei der NC-Programmierung im Formbau. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 1989. – ISBN 978–3–540–51742–9

Literaturverzeichnis

- [154] ZUEHLKE, D. : SmartFactory – from Vision to Reality in Factory Technologies. In: *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control*. Seoul, Korea, Jul. 2008, S. 14101–14108
- [155] ZUEHLKE, D. : SmartFactory – Towards a factory-of-things. In: *Annual Reviews in Control*, Elsevier Ltd, 2010, S. 129–138

A

Anhang

Als repräsentatives Anwendungsbeispiel wird die Fertigung des Pneumatikzylinderbodens vom Typ D40 in der Prozesslernfabrik *Center für industrielle Produktivität* (CiP) der Technischen Universität Darmstadt eingesetzt. Abbildung A.1 stellt die verschiedenen Fertigungszustände eines gefertigten Pneumatikzylinderbodens dar.



Abbildung A.1: Zwischenzustände eines Pneumatikzylinderbodens vom Typ D40

Die Tabellen A.1, A.2 und A.3 listet beispielhaft die Messdaten auf, die im Rahmen der Validierung für die Prüfmaße der gefertigten Werkstücke als Informationsträger nach dem Ablaufarbeitsplan erfasst worden sind (vgl. Abbildung A.2 und Abbildung A.3).

Die Messdaten sind mit verschiedenen Messmitteln erfasst worden. Eingesetzt worden sind folgende Messmittel:

- *Messschieber* für die Messung der Höhe des Rohmaterials und der Breite des Zylinderbodens,

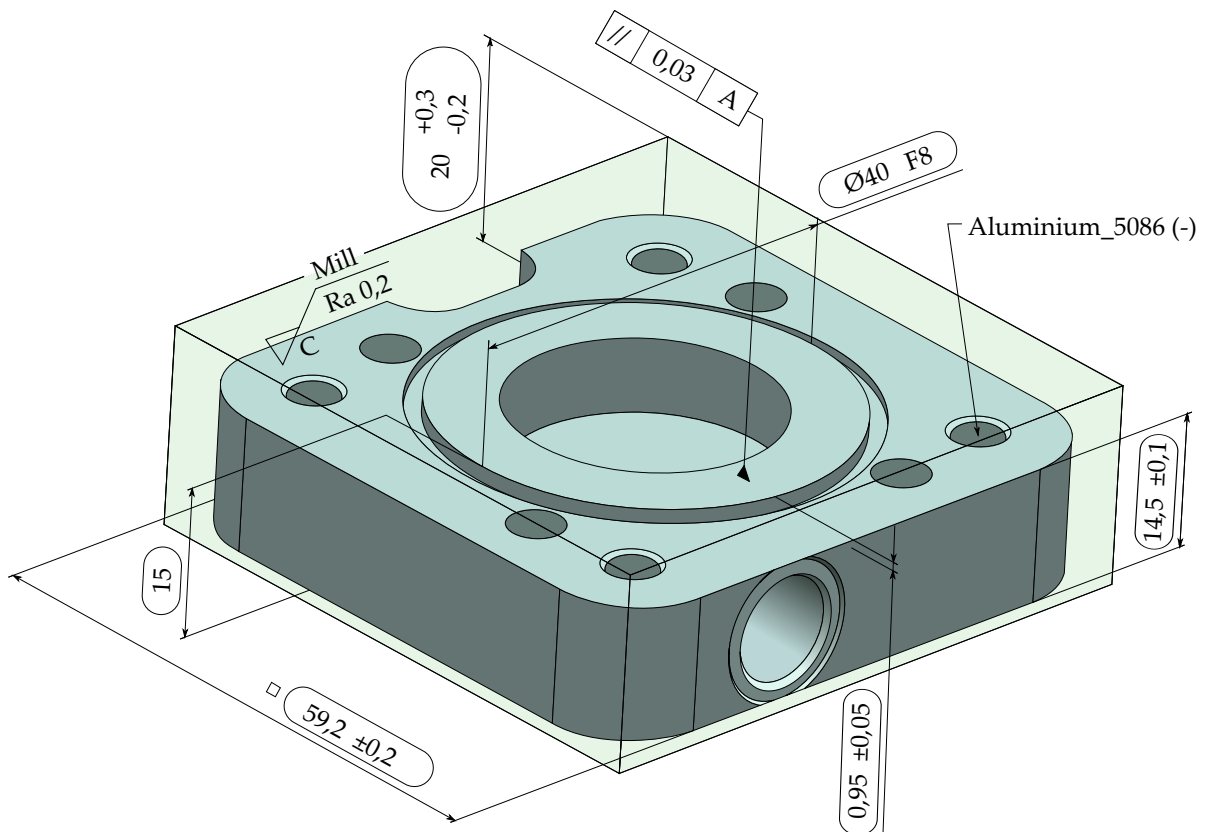


Abbildung A.2: Prüfmaße des Pneumatikzylinderbodens vom Typ D40

- *Schraublehre* für die Messung der Breite der Ringfläche und der Höhe der Dichtfläche,
- *Messuhr* für die Messung der Parallelität der Oberseite und der Tiefe der Nut,
- *MarSurf GD25* zur Oberflächenmessung der Oberseite und
- die Koordinatenmessmaschine *Leitz PMM 864* als alternatives Messmittel für die Messung der Prüfmaße.

Die Auflistung aller Messdaten aus der Koordinatenmessung der einzelnen Werkstücke überschreitet den Umfang der vorliegenden Dissertation und ist daher nicht im Anhang enthalten.

Auftragsnummer	Auftragsangaben	Auftragsmenge	Losnummer			
2015-08-03-0815		126 Stück	2 Stück			
Sachnummer Ausgabe	Bezeichnung des Arbeitsgegenstands	Zeichnungsnummer	Abnahmevorschrift			
boden_100-D40-A	Zylinderboden D40					
Sachnummer Eingabe	Bezeichnung des Ausgangsmaterials	Menge und Mengeneinheit	Ausgangsmaß und -gewicht			
rohteil_100-D40-A	AlM/gSi0,5F22		60,0 x 60,0 x 20,0 mm 0,189 kg			
Vorgangsnummer	Vorgangsbezeichnung			Vorgabezeiten		Referenzmerkmale
	Vorgangsfamilie	Arbeitsplatz, Betriebsmittel	Werkzeug, Vorrichtung, Hilfsmittel	Rüstzeit	Stückzeit	
1	Ablängen	Kasto SBA A2	Kühlmittel			MATERIAL
2	Waschen	Waschstation	Washwasser			
3	Messen der Rohmaterialhöhe	Handmessung	Schieblehre			HOEHE_ROHMATERIAL
4	Fräsen der Unterseite	DMC 50H	Kühlmittel, Werkzeugaufnahme			
5	Fräsen der Oberseite	DMC 50H	Kühlmittel, Werkzeugaufnahme			
6	Waschen	Waschstation	Washwasser			
7	Messen der Oberfläche	MarSurf GD25				OBERFLAECHE_OBERSEITE
8	Messen der Abmaße	Leitz PMM 864	Werkzeugaufnahme			HOEHE_ZYLINDERBODEN HOEHE_DICHTFLAECHE BREITE_RINGFLAECHE TIEFE_NUT PARALLELTAET_OBERSEITE BREITE_ZYLINDERBODEN

Abbildung A.3: Arbeitsablaufplan des Pneumatikzylinderbodens vom Typ D40 (Ausschnitt)

Messdaten zur Parallelität der Oberseite

Tabelle A.1: Messdaten zur Parallelität der Oberseite
aus 126 gefertigten Pneumatikzylinderböden

Werkstück	Parallelität [mm]	Werkstück	Parallelität [mm]
1	0,026	25	0,022
2	0,028	26	0,017
3	0,032	27	0,017
4	0,022	28	0,021
5	0,024	29	0,023
6	0,026	30	0,019
7	0,028	31	0,018
8	0,025	32	0,024
9	0,024	33	0,017
10	0,028	34	0,026
11	0,022	35	0,017
12	0,027	36	0,025
13	0,024	37	0,016
14	0,024	38	0,022
15	0,031	39	0,026
16	0,035	40	0,023
17	0,016	41	0,047
18	0,019	42	0,023
19	0,040	43	0,026
20	0,024	44	0,016
21	0,023	45	0,019
22	0,029	46	0,021
23	0,019	47	0,021
24	0,018	48	0,023

Fortsetzung auf der nächsten Seite...

Messdaten zur Parallelität der Oberseite

Fortsetzung von vorheriger Seite...

Werkstück	Parallelität [mm]
49	0,022
50	0,020
51	0,026
52	0,022
53	0,024
54	0,024
55	0,021
56	0,019
57	0,017
58	0,024
59	0,021
60	0,017
61	0,018
62	0,029
63	0,018
64	0,018
65	0,024
66	0,026
67	0,020
68	0,019
69	0,015
70	0,017
71	0,017
72	0,027
73	0,015
74	0,018
75	0,020
76	0,020

Werkstück	Parallelität [mm]
77	0,019
78	0,019
79	0,018
80	0,016
81	0,017
82	0,021
83	0,017
84	0,027
85	0,019
86	0,056
87	0,012
88	0,025
89	0,022
90	0,029
91	0,023
92	0,022
93	0,042
94	0,019
95	0,022
96	0,021
97	0,036
98	0,026
99	0,013
100	0,016
101	0,021
102	0,021
103	0,024
104	0,018

Fortsetzung auf der nächsten Seite...

A Anhang

Fortsetzung von vorheriger Seite...

Werkstück	Parallelität [mm]
105	0,016
106	0,023
107	0,021
108	0,017
109	0,016
110	0,015
111	0,025
112	0,021
113	0,028
114	0,020
115	0,020

Werkstück	Parallelität [mm]
116	0,017
117	0,024
118	0,022
119	0,020
120	0,023
121	0,022
122	0,017
123	0,022
124	0,022
125	0,039
126	0,025

Messdaten zur Breite der Ringfläche

Tabelle A.2: Messdaten zur Breite der Ringfläche
aus 126 gefertigten Pneumatikzylinderböden

Werkstück	Breite [mm]	Werkstück	Breite [mm]
1	-0,054	25	-0,052
2	-0,060	26	-0,052
3	-0,063	27	-0,044
4	-0,050	28	-0,049
5	-0,049	29	-0,058
6	-0,063	30	-0,042
7	-0,047	31	-0,053
8	-0,059	32	-0,056
9	-0,056	33	-0,048
10	-0,056	34	-0,043
11	-0,058	35	-0,048
12	-0,059	36	-0,059
13	-0,054	37	-0,039
14	-0,056	38	-0,050
15	-0,047	39	-0,046
16	-0,055	40	-0,058
17	-0,047	41	-0,058
18	-0,054	42	-0,056
19	-0,058	43	-0,054
20	-0,060	44	-0,058
21	-0,062	45	-0,052
22	-0,061	46	-0,059
23	-0,056	47	-0,053
24	-0,057	48	-0,057

Fortsetzung auf der nächsten Seite...

A Anhang

Fortsetzung von vorheriger Seite...

Werkstück	Breite [mm]
49	-0,057
50	-0,060
51	-0,056
52	-0,059
53	-0,049
54	-0,055
55	-0,059
56	-0,061
57	-0,048
58	-0,052
59	-0,058
60	-0,051
61	-0,052
62	-0,046
63	-0,048
64	-0,058
65	-0,044
66	-0,056
67	-0,055
68	-0,049
69	-0,056
70	-0,046
71	-0,042
72	-0,063
73	-0,049
74	-0,052
75	-0,051
76	-0,057

Werkstück	Breite [mm]
77	-0,054
78	-0,055
79	-0,050
80	-0,053
81	-0,051
82	-0,051
83	-0,041
84	-0,055
85	-0,053
86	-0,051
87	-0,044
88	-0,057
89	-0,039
90	-0,059
91	-0,061
92	-0,058
93	-0,056
94	-0,051
95	-0,052
96	-0,058
97	-0,054
98	-0,056
99	-0,054
100	-0,056
101	-0,056
102	-0,058
103	-0,056
104	-0,051

Fortsetzung auf der nächsten Seite...

Messdaten zur Breite der Ringfläche

Fortsetzung von vorheriger Seite...

Werkstück	Breite [mm]
105	-0,040
106	-0,060
107	-0,052
108	-0,060
109	-0,053
110	-0,062
111	-0,060
112	-0,047
113	-0,062
114	-0,056
115	-0,059

Werkstück	Breite [mm]
116	-0,046
117	-0,057
118	-0,057
119	-0,057
120	-0,058
121	-0,054
122	-0,057
123	-0,051
124	-0,051
125	-0,058
126	-0,024

Messdaten zur Tiefe der Nut

Tabelle A.3: Messdaten zur Tiefe der Nut
aus 126 gefertigten Pneumatikzylinderböden

Werkstück	Tiefe [mm]	Werkstück	Tiefe [mm]
1	0,948	25	0,957
2	0,971	26	0,966
3	0,947	27	0,936
4	0,952	28	0,923
5	0,956	29	0,943
6	0,965	30	0,961
7	0,954	31	0,936
8	0,949	32	0,938
9	0,951	33	0,940
10	0,960	34	0,958
11	0,948	35	0,930
12	0,967	36	0,936
13	0,958	37	0,939
14	0,967	38	0,936
15	0,942	39	0,965
16	0,956	40	0,958
17	0,946	41	0,953
18	0,968	42	0,930
19	0,969	43	0,956
20	0,951	44	0,948
21	0,961	45	0,934
22	0,961	46	0,930
23	0,970	47	0,949
24	0,951	48	0,948

Fortsetzung auf der nächsten Seite...

Fortsetzung von vorheriger Seite...

Werkstück	Tiefe [mm]
49	0,956
50	0,966
51	0,948
52	0,966
53	0,943
54	0,964
55	0,947
56	0,946
57	0,957
58	0,967
59	0,942
60	0,968
61	0,954
62	0,947
63	0,964
64	0,938
65	0,969
66	0,951
67	0,943
68	0,963
69	0,945
70	0,943
71	0,964
72	0,951
73	0,966
74	0,935
75	0,946
76	0,935

Werkstück	Tiefe [mm]
77	0,938
78	0,929
79	0,949
80	0,930
81	0,945
82	0,927
83	0,944
84	0,945
85	0,931
86	0,950
87	0,943
88	0,933
89	0,943
90	0,978
91	0,977
92	0,969
93	0,996
94	0,972
95	0,958
96	0,971
97	0,975
98	0,963
99	0,963
100	0,961
101	0,973
102	0,970
103	0,967
104	0,996

Fortsetzung auf der nächsten Seite...

A Anhang

Fortsetzung von vorheriger Seite...

Werkstück	Tiefe [mm]
105	0,970
106	0,950
107	0,945
108	0,955
109	0,948
110	0,955
111	0,941
112	0,961
113	0,945
114	0,963
115	0,944

Werkstück	Tiefe [mm]
116	0,967
117	0,965
118	0,975
119	0,996
120	0,977
121	0,957
122	0,958
123	0,969
124	0,971
125	0,973
126	0,335