

Cordula Czwick



---

# Cyber Zwilling als Grundlage für Produkt-Service Systeme

---

**SHAKER  
VERLAG**

---

# **Cyber Zwilling als Grundlage für Produkt-Service Systeme**

Vom Fachbereich Maschinenbau  
an der Technischen Universität Darmstadt  
zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

**Cordula Dorothea Czwick, M.Sc.**

**geb. Auth**

aus Bad Soden-Salmünster

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner
Tag der Einreichung:	29.06.2020
Tag der mündlichen Prüfung:	14.10.2020

Darmstadt 2020

D17



Forschungsberichte aus dem Fachgebiet  
Datenverarbeitung in der Konstruktion

Band 68

**Cordula Czwick**

**Cyber Zwilling als Grundlage  
für Produkt-Service Systeme**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag  
Düren 2020

### **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., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7735-3

ISSN 1435-1129

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Vorwort des Herausgebers

Die moderne Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) bietet vielfältige Innovations- und Leistungspotentiale, 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 Schriftenreihe 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 Produkte.

Im Forschungsfeld Industrie 4.0 und Digitalisierung gewinnen Cyber-Physische Zwillinge zunehmend an Bedeutung. Cyber-Physische Zwillinge können in die beiden Bestandteile des Cyber Zwillings sowie des Physischen Zwillings unterteilt werden, die sich durch eine simultane Entwicklung und eine bidirektionale Kommunikation innerhalb der Nutzung auszeichnen. Cyber-Physische Zwillinge unterscheiden sich durch die Integration des Servicegedankens maßgeblich von Cyber-physischen Systemen und Digitalen Zwillingen. Mithilfe der im Physischen Zwilling aufgenommenen Daten können im Cyber Zwilling serviceorientierte Auswertungen zum Verhalten des Physischen Zwillings auf Basis von Modellen durchgeführt, für den Kunden präsentiert und das zukünftige Verhalten des Physischen Zwillings entsprechend kundenindividueller Präferenzen angepasst werden. Die Verwendung von Cyber-Physischen Zwillingen zielt somit auf das Angebot kundenindividueller digitaler Services, die ergänzend zum physischen Produkt Zusatzleistungen im Sinne eines Produkt-Service Systems anbieten. Zum aktuellen Stand der Technik und Forschung fehlt jedoch sowohl die Fokussierung auf die

Integration des Servicegedankens in bestehende Schlüsseltechnologien in Industrie 4.0 als auch die Konzeption der Cyber-Physischen Zwillinge für ein kundenindividuelles Angebot digitaler Services ergänzend zu physischen Produkten.

Frau Czwick nimmt sich dieser Problemstellung anhand der vorliegenden Dissertation an und konzipiert einen Cyber Zwilling für die kundenindividuelle Serviceentwicklung. In der vorliegenden Dissertation werden daher zum einen die kundenindividuelle Servicebildung und zum anderen die Servicebereitstellung im Cyber Zwilling entwickelt sowie ein zugrundeliegender modellbasierter Ansatz erarbeitet. Der resultierende modellbasierte Ansatz verknüpft und vereinigt Forschungsinhalte unterschiedlicher Disziplinen und stellt den Kern der Dissertation dar. Durch die Verwendung von Cyber Zwillingen zur Bereitstellung produktergänzender Services können kundenindividuelle Produkt-Service Systeme als neuartige Geschäftsmodelle entwickelt und zukünftig industriell etabliert werden. Die vorliegende Dissertation liefert einen wichtigen Beitrag zur Modellierung kundenindividueller Services durch die Konzeption des Cyber Zwillinges.

Darmstadt, Oktober 2020

Reiner Anderl

## Vorwort des Autors

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion (DiK) im Fachbereich Maschinenbau an der Technischen Universität Darmstadt.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl, Leiter des Fachgebiets DiK. Insbesondere seine innovativen Anregungen und fachlichen Diskussionen haben neben der Bereitstellung von großzügigen wissenschaftlichen Freiräumen und einem angenehmen Arbeitsklima signifikant zur Entstehung der Dissertation beigetragen. Dank seines Vertrauens konnte ich nicht nur auf wissenschaftlicher, sondern auch auf industrieller und strategischer Ebene zahlreiche Einblicke erlangen und wertvolle Erfahrungen sammeln.

Weiterhin möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner, Leiter des Fachgebiets und Instituts für Werkstoffkunde an der Technischen Universität Darmstadt, herzlichst für die Übernahme des Korreferats und die kritische Durchsicht der Dissertation danken.

Bedanken möchte ich mich zudem bei allen Kolleginnen und Kollegen für die gute Zusammenarbeit, den interessanten wissenschaftlichen Austausch und die vielen schönen Momente innerhalb und außerhalb des Fachgebiets DiK. Besonderer Dank gilt meinem ehemaligen Kollegen Dr.-Ing. Alexander Arndt für die zahlreichen guten Ratschläge und das Überzeugen zum Antreten meiner Stelle als wissenschaftliche Mitarbeiterin.

Mein tiefer herzlicher Dank gilt auch meiner Familie, insbesondere meinen lieben Eltern Anne und Wilhelm Auth, sowie meinen Freunden, die mich auf meinem Weg stets begleitet sowie unterstützt haben und mir jederzeit verlässlich zur Seite standen.

Besonderer Dank gilt meinem Ehemann Stephan für seinen uneingeschränkten Optimismus, sein andauerndes Verständnis und die zahlreichen interessanten Diskussionen, die wir gemeinsam geführt haben und hoffentlich weiterhin führen werden.





# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort des Herausgebers</b> .....	<b>III</b>
<b>Vorwort des Autors</b> .....	<b>V</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>VII</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>X</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>XII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Symbolverzeichnis</b> .....	<b>XV</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivation und Problemstellung .....	2
1.2 Zielsetzung .....	5
1.3 Aufbau der Dissertation .....	8
<b>2 Grundlagen und Stand der Technik</b> .....	<b>9</b>
2.1 Digitalisierung und Industrie 4.0 .....	9
2.1.1 Cyber-physische Systeme .....	13
2.1.2 Cyber-physische Produktionssysteme .....	16
2.1.3 Digitaler Zwilling .....	17
2.1.4 Cyber-Physische Zwillinge .....	21
2.2 Produkt-Service Systeme .....	22
2.2.1 Definition und Bestandteile von Produkt-Service Systemen.....	23
2.2.2 Nutzen und Anwendung von Produkt-Service Systemen .....	26
2.2.3 Smart Services.....	29
2.3 Additive Fertigung.....	30
2.3.1 Definition Additiver Fertigung.....	31
2.3.2 Prozesskette der Additiven Fertigung .....	33
2.3.3 Produktlebenszyklus der Additiven Fertigung .....	36
2.3.4 Konstruktionsprozess additiv gefertigter Bauteile.....	38
2.3.5 Übersicht additiver Fertigungsverfahren.....	40
2.3.6 Pulverbettbasiertes Schmelzen metallischer Werkstoffe .....	42
2.3.7 Potentiale und Herausforderungen Additiver Fertigung .....	45

2.4	Fazit und Forschungspotential .....	49
<b>3</b>	<b>Handlungsbedarf und Anforderungsprofil.....</b>	<b>51</b>
3.1	Handlungsbedarf .....	51
3.2	Zieldefinition .....	53
3.3	Anwendungsfall .....	54
3.4	Anforderungen.....	59
3.4.1	Anforderungen an die Service- und Potentialfelder.....	59
3.4.2	Anforderungen an die Funktion, Nutzung und Struktur des Cyber Zwillings.....	62
3.4.3	Anforderungen an das Informationsmodell.....	64
3.4.4	Anforderungen an die Implementierung des Cyber Zwillings .....	67
3.4.5	Anforderungen an die Validierung .....	70
3.4.6	Übersicht der Anforderungen.....	71
<b>4</b>	<b>Konzeption eines Cyber Zwillings als Grundlage für Produkt- Service Systeme .....</b>	<b>77</b>
4.1	Definition der Begrifflichkeiten .....	78
4.2	Konzeptionelle Vorgehensweise .....	79
4.3	Konzeptstruktur .....	83
4.4	Entwicklung der Service- und Potentialfelder .....	87
4.4.1	Definition der allgemeinen Servicefelder .....	89
4.4.2	Definition der Potentialfelder der Additiven Fertigung .....	91
4.4.2.1	Qualität .....	95
4.4.2.2	Zuverlässigkeit.....	100
4.4.2.3	Ökologische Nachhaltigkeit .....	104
4.4.2.4	Ökonomische Nachhaltigkeit .....	109
4.4.2.5	Soziale Nachhaltigkeit .....	113
4.4.3	Servicebildung mithilfe der Service- und Potentialfelder ..	115
4.5	Entwicklung der Anwendungsschicht für die Bereitstellung von Services.....	120
4.5.1	Modellierung der Servicebereitstellung.....	121
4.5.2	Funktionalität der Benutzungsoberfläche.....	124
4.6	Entwicklung der Operationsschicht zur Verarbeitung der Serviceanfragen .....	127
4.6.1	Kategorisierung der Beurteilungskriterien .....	127
4.6.2	Konfiguration der Operationsschicht.....	129
4.7	Entwicklung der Informationsschicht zur Bereitstellung notwendiger Informationen .....	131
4.7.1	Kernmodell Informationsmanagement im Cyber Zwillings ..	133

---

4.7.2	Partialmodell Servicebildung.....	136
4.7.3	Partialmodell Physischer Zwilling.....	137
4.8	Gesamtkonzeption des Cyber Zwillings .....	138
4.9	Fazit und Zusammenfassung .....	141
<b>5</b>	<b>Prototypische Implementierung.....</b>	<b>145</b>
5.1	Vorgehen und Struktur der technischen Umsetzung.....	145
5.2	Technische Umsetzung der Implementierung .....	147
5.2.1	Webserver .....	148
5.2.2	Modellierungssystem.....	150
5.2.3	Datenbank.....	152
5.2.4	Sicherheit.....	152
5.3	Fazit .....	154
<b>6</b>	<b>Validierung und Verifikation.....</b>	<b>157</b>
6.1	Service- und Produktentwicklung.....	157
6.1.1	Kundenspezifisches Anforderungsprofil und Zusammenhänge im Entwicklungsprozess der Zwillinge...158	
6.1.2	Entwicklung des Cyber Zwillings.....	160
6.1.2.1	Entwicklung des kundenindividuellen Service ....	160
6.1.2.2	Entwicklung der Schichten im Cyber Zwilling.....	162
6.1.3	Entwicklung des Physischen Zwillings.....	164
6.2	Durchführung der Validierung.....	166
6.2.1	Servicebereitstellung im Cyber Zwilling .....	167
6.2.2	Servicenutzung im Cyber Zwilling.....	171
6.3	Bewertung der Validierung.....	174
6.4	Verifikation des Anforderungsprofils .....	176
6.5	Fazit .....	182
<b>7</b>	<b>Ausblick.....</b>	<b>185</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>189</b>
<b>9</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>193</b>
<b>10</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>222</b>
10.1	Anhang A .....	222
10.2	Anhang B.....	223

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Übersicht der vier industriellen Revolutionen .....	9
Abbildung 2-2: Übersicht ausgewählter Ansätze und Technologien in Industrie 4.0 .....	10
Abbildung 2-3: Bestandteile und Funktionalitäten Cyber-physischer Systeme...	14
Abbildung 2-4: Beispielhafte Anwendungen eines Digitalen Zwillinges .....	20
Abbildung 2-5: Übersicht möglicher Produkt-Service Systeme in der Kategorisierung nach Tukker (2004) inklusive Beschreibung und Nutzen .....	27
Abbildung 2-6: Prozesskette der Additiven Fertigung.....	33
Abbildung 2-7: Vergleich der Approximationsgenauigkeiten.....	34
Abbildung 2-8: Lebenszyklus der additiven Fertigung, in Anlehnung an Auth et al. 2018.....	37
Abbildung 2-9: Prozess und Anlage des pulverbettbasierten Schmelzens .....	44
Abbildung 2-10: Übersicht der Potentiale Additiver Fertigung .....	47
Abbildung 2-11: Übersicht der Herausforderungen bei der Additiven Fertigung .....	49
Abbildung 3-1: Anwendungsfalldiagramm zur Bereitstellung von Services im Cyber Zwilling.....	55
Abbildung 4-1: Inhaltliche und methodische Konzeptionierung des Cyber Zwillinges .....	83
Abbildung 4-2: Methodische Konzeptionierung des Cyber Zwillinges im Schichtenmodell .....	84
Abbildung 4-3: Vorgehen zur Bildung der Potentialfelder .....	92
Abbildung 4-4: Entwicklung der Potentialfelder anhand der identifizierten Potentiale und Herausforderungen Additiver Fertigung .....	94
Abbildung 4-5: Zusammenhang zwischen Servicefeldern, Service, Potentialfeldern, Beurteilungskriterien und Einflussfaktoren .....	117
Abbildung 4-6: Matrixdarstellung der Beurteilungskriterien über die Lebenszyklusphasen .....	119
Abbildung 4-7: Aktivität A0 Services im Cyber Zwilling bereitstellen .....	122
Abbildung 4-8: Aktivitäten A1, A2, A3 und A4 .....	123
Abbildung 4-9: Sequenzdiagramm der Servicenutzung durch den Kunden .....	125
Abbildung 4-10: Übersicht der möglichen Kategorisierung der Beurteilungskriterien .....	128
Abbildung 4-11: Aktivitätsdiagramm zur Konfiguration der Operationsschicht .....	130
Abbildung 4-12: Schematische Struktur des Informationsmodells.....	133
Abbildung 4-13: Kernmodell Informationsmanagement im Cyber Zwilling .....	135
Abbildung 4-14: Partialmodell zur Servicebildung .....	136
Abbildung 4-15: Partialmodell zum Physischen Zwilling.....	138
Abbildung 4-16: Aktivitätsdiagramm zur Servicenutzung im Cyber Zwilling...	140

---

Abbildung 5-1: Struktur und Elemente der prototypischen Implementierung ..	146
Abbildung 5-2: Codebeispiel zum Starten des Webservers .....	148
Abbildung 5-3: Codebeispiel zur Durchführung von Aktionen .....	149
Abbildung 5-4: Beispielhafter Auszug aus Android Studio .....	151
Abbildung 5-5: Maßnahmen des Sicherheitskonzepts im Überblick .....	153
Abbildung 6-1: Beispielhaftes Anforderungsprofil des Kunden .....	158
Abbildung 6-2: Beispielhafter gegenseitiger Einfluss der Anforderungen zwischen Cyber und Physischem Zwilling im Entwicklungsprozess .....	159
Abbildung 6-3: Ausgewählte und beeinflussende Beurteilungskriterien.....	161
Abbildung 6-4: Exemplarische Konstruktion der Kurbel.....	166
Abbildung 6-5: Verknüpfung der Benutzungsoberflächen in der Applikation...	168
Abbildung 6-6: Startseite der Applikation im emulierten Smartphone (1), Übersicht der Activities (2,3) und Verknüpfung der Buttons (4).	171
Abbildung 6-7: Benutzungsoberflächen zur Durchführung einer Fahrt (links) und zur Auswertung dieser Fahrt (rechts) .....	172
Abbildung 6-8: Benutzungsoberflächen der Jahresauswertung (links) und der persönlichen Entwicklungsmöglichkeiten (rechts).....	174
Abbildung 10-1: Konkretisiertes Anwendungsfalldiagramm zur Bereitstellung eines kundenindividuellen Service im Cyber Zwilling .....	222
Abbildung 10-2: Konkretisiertes Anwendungsfalldiagramm zur Nutzung eines kundenindividuellen Service im Cyber Zwilling .....	223

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Anforderungsprofil an die Konzeption eines Cyber Zwillings als Grundlage für Produkt-Service Systeme (fortlaufend) .....	72
Tabelle 4-1: Zusammenfassung der Beurteilungskriterien und beispielhaften Einflussfaktoren für das Potentialfeld Qualität .....	98
Tabelle 4-2: Zusammenfassung der Beurteilungskriterien und beispielhaften Einflussfaktoren für das Potentialfeld Zuverlässigkeit .....	103
Tabelle 4-3: Zusammenfassung der Beurteilungskriterien und beispielhaften Einflussfaktoren für das Potentialfeld ökologische Nachhaltigkeit.....	107
Tabelle 4-4: Zusammenfassung der Beurteilungskriterien und beispielhaften Einflussfaktoren für das Potentialfeld ökonomische Nachhaltigkeit.....	112
Tabelle 4-5: Zusammenfassung der Beurteilungskriterien und beispielhaften Einflussfaktoren für das Potentialfeld soziale Nachhaltigkeit .....	114
Tabelle 6-1: Übersicht der notwendigen Informationen in der Validierung .....	170
Tabelle 6-2: Verifikation des Anforderungsprofils (fortlaufend) .....	178

## Abkürzungsverzeichnis

3D.....	dreidimensional
AMF .....	Additive Manufacturing File Format
API-Key .....	Application Programming Interface
ASCII .....	American Standard Code for Information Interchange
ASTM .....	American Society for Testing and Materials
BPMN .....	Business Process Modeling Notation
CAD.....	Computer Aided Design
CAX.....	Computer Aided x
CO <sub>2</sub> .....	Kohlendioxid
CPPS.....	Cyber-physische Produktionssysteme
CPS.....	Cyber-physische Systeme
DfAM.....	Design for Additive Manufacturing
DIN.....	Deutsches Institut für Normung
eEPK.....	erweiterte Ereignisgesteuerte Prozesskette
EIGA.....	Electrode Induction Melting Inert Gas Atomization
EN .....	Europäische Norm
EPK.....	Ereignisgesteuerte Prozesskette
F .....	Festforderung
FEM.....	Finite Elemente Methode
GPS.....	Global Positioning System
IEC.....	International Electrotechnical Commission
IGES .....	Initial Graphics Exchange Specification
IoT.....	Internet of Things
IP.....	Internet Protocol-Adresse
IT.....	Informationstechnik
ISO .....	Internationale Organisation für Normung
MQTT .....	Message Queue Telemetry Transport
MTBF.....	Mean Time Between Failure



MTTF .....Mean Time To Failure  
MTTFF .....Mean Time To First Failure  
NASA .....National Aeronautics and Space Administration  
NoSQL.....Not only SQL  
OPC UA.....Open Platform Communications Unified Architecture  
PBF .....Pulverbettbasiertes Schmelzen (engl. powder bed fusion)  
PBF-EB .....Pulverbettbasiertes Schmelzen mit Elektronenstrahl  
PBF-LB .....Pulverbettbasiertes Schmelzen mit Laserstrahl  
PZ .....Physischer Zwilling  
QR.....Quick Response  
RFID.....Radio Frequency Identification  
RUL.....Remaining Useful Life  
SADT.....Structured Analysis and Design Technique  
SQL.....Structured Query Language  
SSL.....Secure Sockets Layer  
STEP .....Standard for the Exchange of Product Model Data  
STL .....Surface Tessellation Language, Standard Triangulation Language  
StVG.....Straßenverkehrsgesetz  
SysML .....Systems Modeling Language  
UML .....Unified Modeling Language  
URL.....Uniform Resource Locator  
UV .....Ultraviolettstrahlung  
VDI.....Verein Deutscher Ingenieure  
VIGA .....Vacuum Induction Melting Inert Gas Atomization  
VRML.....Virtual Reality Modelling Language  
W .....Wunsch  
WSGI.....Web Server Gateway Interface-Schnittstelle  
XML .....Extensible Markup Language  
Yb-YAG .....Ytterbium-Yttrium-Aluminium-Granat

## Symbolverzeichnis

$CO_2$ .....	Kohlendioxid
$CO_{2,Auto,NN}$ ...	Eingesparte Emissionen bei Nichtnutzung des Automobils
$CO_{2,Pedelec}$ ....	Emissionen des Pedelecs
$E_{CO_2}$ .....	CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktor für den zugrundeliegenden Strommix
$F_{Pedal}$ .....	Einwirkende Kraft auf die Pedale
$l_{Kurbel}$ .....	Länge der Kurbel
$M$ .....	Angreifendes Moment
$P_{Tritt}$ .....	Trittleistung des Menschen
$P_{Motor}$ .....	Leistung des Elektromotors
$s_{Pendel}$ .....	Pendelstrecke
$V_{Auto}$ .....	Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch des Automobils
$V_{Elektromotor}$ .	Durchschnittlich festgelegter Verbrauchswert des Elektromotors
$x_{Kraftstoff}$ ....	CO <sub>2</sub> -Äquivalent für den zugrundeliegenden Kraftstoff
$\omega$ .....	Kreisfrequenz