

FAU Studien aus dem Maschinenbau 335

Hans Fleischmann

Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme



Hans Fleischmann

Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 335

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Hans Fleischmann

Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS)

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Erlangen FAU University Press 2019 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.

Bitte zitieren als

Fleischmann, Hans. 2019. *Modellbasierte Zustands- und Prozess-überwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 335.

Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-257-4.

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren. Sie sind nutzbar unter der Creative Commons Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über den OPUS Server der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar: https://opus4.kobv.de/opus4-fau/home

Verlag und Auslieferung: FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-256-7 (Druckausgabe) eISBN: 978-3-96147-257-4 (Online-Ausgabe)

ISSN: 2625-9974

DOI: 10.25593/978-3-96147-257-4

Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme

Der Technischen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

zur Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Hans Fleischmann, M.Sc.

aus Fürth

Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen

Prüfung: 12.03.2019

Vorsitzender des

Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr. Freimut Bodendorf

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Dem Lehrstuhlinhaber, Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke, bin ich für seine wohlwollende Unterstützung und großzügige Förderung, welche die Entstehung dieser Arbeit ermöglichte, zu besonderem Dank verpflichtet. Auch danke ich Herrn Prof. Dr. Freimut Bodendorf für die Übernahme des Zweitgutachtens. Weiterhin geht mein Dank an Prof. Dr.-Ing. Elmar Nöth für die Mitgliedschaft im Prüfungsausschuss. Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann, ehemaliger Inhaber des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Den Mitarbeitern und Studierenden des Lehrstuhls, mit denen ich während der letzten Jahre zusammengearbeitet habe, gilt mein Dank für ihr Engagement. Weiterhin möchte ich mich bei den Industriepartnern für die intensive fachliche Zusammenarbeit, durch die Lösungen im Umfeld der vierten industriellen Revolution entstanden sind, bedanken. Großer Dank gilt ebenfalls Johannes Kohl, Jochen Bönig, Jochen Zeitler, Christian Fischer, Annika Höft und Alexander Kühl für die angenehme Zusammenarbeit, die zahlreichen gemeinsamen Aktivitäten, die wissenschaftlichen Publikationen und die intensiven Diskussionen, die wesentlich zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen haben.

Besonderer Dank gilt meinen Großeltern, die mich in meiner Kindheit und Jugend gefördert und mich auf meinen Weg gebracht haben. Nicht zuletzt gilt mein herzlicher Dank meiner Lebensgefährtin Julia, die durch ihre Unterstützung einen wesentlichen Beitrag geleistet hat.

Fürth, im Januar 2019

Hans Fleischmann

Inhaltsverzeichnis

ADK	urzu	ngsve	rzeichnis 1	X
1	Einleitung und Zielstellung1			
2	Stand der Technik und Forschung			5
	2.1	Indu	strie 4.0	5
		2.1.1	Transformation der produzierenden Industrie	5
		2.1.2	Informations- und Automatisierungstechnologie im Wandel	8
		_	Referenzmodelle und -architekturen	
			Semantische Interoperabilität	
	2.2		ınds- und Prozessüberwachung	
			Grundlagen	
			Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung	
			Maschinelles Lernen	
	2.3	-	p-cyber-physische Systeme2	-
	_		l der Forschung2	
			Lösungsansätze zur Systemintegration 2	
			Lösungsansätze zur Herstellung von	,
			Wandlungsfähigkeit	;2
		2.4.3	Lösungsansätze zur Applikation maschineller	
		_	Lernverfahren	
			mmenfassung 3	
			llungsbedarf	
3	Lös	ungsv	w eg 4	5
4	Mo	dellba	asierte Zustands- und Prozessüberwachung	
	auf	Basis	sozio-cyber-physischer Systeme 4	9
	4.1	Verw	altungsschalen für die Zustands- und	
		Proze	essüberwachung4	9
	4.2	Ident	ifikation von Systemmodellen5	55
			Lösungsansatz 5	
			Architekturkonzept 5	
			Referenzarchitektursicht	
		4.2.4	Entwicklungssicht5	Ö

	4.3	Mode	ellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung	61
		4.3.1	Lösungsansatz	. 63
		4.3.2	Systemeigenschaften	. 66
			Referenzarchitektursicht	
			Entwicklungssicht	
		4.3.5	4+2-Sichtenmodell	· 74
	4.4	Bedie	nkonzept	. 76
		4.4.1	Lösungsansatz	. 78
		4.4.2	Referenzarchitektursicht	. 8o
		4.4.3	Entwicklungssicht	. 82
		4.4.4	Visualisierungs- und Kernelementgestaltung	. 85
	4.5	Verb	esserung von Diagnosefähigkeiten	. 89
	4.6	Optio	nierungskonzept	. 92
5	Val	idieru	ıng	. 95
	5.1	Wan	dlungsfähige Prüfsysteme für elektromechanische	
			ruppen	. 97
		5.1.1	Ausgangssituation, Voruntersuchung und	
			Lösungsansatz	. 98
		5.1.2	Datenakquise und -visualisierung	
		5.1.3	Modellidentifikation	102
		5.1.4	Komponentenzustands- und	
			Prüfprozessüberwachung	106
			Vorausschauende Instandhaltung	
		5.1.6	Ergonomie des Bedienkonzepts	
		5.1.7	Prüfprozessoptimierung	. 112
		5.1.8	Synthese einer Gesamtsystemarchitektur	
		5.1.9	Ergebnisdiskussion	. 116
	5.2	Mehr	spindlige Bearbeitungszentren	. 117
		5.2.1	Ausgangssituation und Voruntersuchung	. 117
			Lösungsansatz	
		5.2.3	Datenakquise und -visualisierung	. 119
		5.2.4	Synthese einer Gesamtsystemarchitektur	124
		5.2.5	Zustandsüberwachung durch Analyse von	
			Motordrehmoment	124
		5.2.6	Zustandsüberwachung durch	
			Messung des Umkehrspiels	126
		5.2.7	Zustandsüberwachung durch	
			Analyse der Beschleunigung	128

	5.2.8	Fertigungsprozessüberwachung	132
	5.2.9	Ergebnisdiskussion	134
	5.3 Füge	verfahren im Elektromaschinenbau	135
	5.3.1	Ausgangssituation und Voruntersuchung	135
		Lösungsansatz	
	5.3.3	Datenakquise und -visualisierung	137
	5.3.4	Modellidentifikation	139
	5.3.5	Synthese einer Gesamtsystemarchitektur	141
	5.3.6	Vorausschauende Instandhaltung	144
	5.3.7	Fügeprozessüberwachung	144
	5.3.8	Ergebnisdiskussion	146
6	Zusamm	enfassung und Ausblick	147
7	Summar	y and outlook	151
8	Anhang.		155
Lita	ratury or zo	sichnic	161

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung Bezeichnung

AC Alarms and Conditions

AML Automation Markup Language
ANODA Anomaly Detection Algorithm
AP Automatisierungspyramide

API Application Programming Interface

AR Augmented Reality

BUTLA Bottom-Up Timing Learning Algorithm
CAEX Computer Aided Engineering Exchange
CIR Common Interoperability Registry

CM Condition Monitoring

CMFB Condition Monitoring-Funktionsblock

CMS Condition Monitoring System
COLLADA COLLAborative Design Activity
CPS Cyber-physisches System

CPPS Cyber-physisches Produktionssystem

CSS Cascading Style Sheets

DA Data Access
DF Digital Factory

DFA Deterministic Finite Automaton

DIMA Decentralized Intelligence for Modular Plants

DIN Deutsches Institut für Normung
DTA Deterministic Timed Automaton

EN Europäische Norm FDI Field Device Integration

FMC Fundamental Modeling Concepts

GMM Gaussian Mixture Model GraphML Graph Modeling Language

HA Historical Access

HMI Human-Machine Interface
HTML Hypertext Markup Language
HTTP Hypertext Transfer Protocol

HyBUTLA Hybrid Bottum-Up Timing Learning Algorithm IEC International Electrotechnical Commission

IoTS Internet of Things and Services

ISO International Organization for Standardization

IT Informationstechnologie

JS JavaScript

JSON JavaScript Object Notation

KGT Kugelgewindetrieb

KNN Künstliches Neuronales Netz

LCL Lower Control Limit
LWL Lower Warning Limit

MDI Minimal Divergence Inference
MEMS Mikroelektromechanisches System
MES Manufacturing Execution System

MIMOSA Machinery Information Management Open

System Alliance

MQTT Message Queuing Telemetry Transport
NMF Non-negative Matrix Factorization
OPC Open Platform Communications

OPC UA Open Platform Communications Unified

Architecture

openAAS open Asset Administration Shell

OSA-CBM Open System Architecture for Condition-Based

Maintenance

OSA-EAI Open System Architecture for Enterprise

Application Integration

OTALA Online Timed Automaton Learning Algorithm

PLC Programmable Logic Controller
PLM Product Lifecycle Management

PROFIBUS Process Field Bus
PROFINET Process Field Network

Prog Programs

PTA Prefix Tree Acceptor

RAMI4.0 Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0

RFID Radio Frequency Identification

RMS Root Mean Square

SDFA Stochastic Deterministic Finite Automaton
SDHA Stochastic Deterministic Hybrid Automaton
SDTA Stochastic Deterministic Timed Automaton

SOA Serviceorientierte Architektur Sozio-CPS Sozio-cyber-physisches System

SPI Serial Peripheral Bus

SPS Speicherprogrammierbare Steuerung

S-CPS Ressourcen-Cockpit für sozio-cyber-physische

Systeme

TCP/IP Transmission Control Protocol /

Internet Protocol

TSN Time-Sensitive Networking

UCL Upper Control Limit

UCM Universal Contacting Modules UML Unified Modeling Language

US Umkehrspiel

UWL Upper Warning Limit

VDI Verein Deutscher Ingenieure

VDMA Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau

VR Virtual Reality
VS Verwaltungsschale

W3C World Wide Web Consortium

WebGL Web Graphics Library

WS WebSocket

XML Extensible Markup Language

1 Einleitung und Zielstellung

Die produzierende Industrie strebt im Rahmen der vierten industriellen Revolution, Industrie 4.0, die Optimierung der klassischen Zielgrößen Qualität, Kosten und Zeit sowie Ressourceneffizienz, Flexibilität, Wandlungsfähigkeit und Resilienz in globalen, volatilen Märkten an [1–4]. Im Mittelpunkt steht die Entwicklung von Smart Factories, in denen sich relevante Objekte, Produktions-, Logistik- und Informationssysteme sowie der Mensch vernetzen [5–9]. Cyber-physische Systeme (CPS) tragen als sensorisierte und aktorisierte, resiliente und intelligente Gesamtsysteme dazu bei, Produktionsprozesse und -maschinen sowie die Produktqualität zu kontrollieren [5, 10–12]. Gekennzeichnet durch Self-X-Fähigkeiten wie Selbstkonfiguration, Selbstdiagnose und Selbstoptimierung sollen diese den Menschen bei seinen Aufgaben in der Produktion unterstützen [13–19].

Die Betriebsführung von Smart Factories wird durch eine Zusammenarbeit von Mensch und CPS geprägt [17, 20–26]. Vordergründig wird die technische Komplexität von Produktionssystemen und damit auch zugehöriger Instandhaltungsprozesse durch die Anforderungen an deren Wandlungsfähigkeit und den hohen Automatisierungsgrad ansteigen [13, 27–35]. Herausforderungen bei der Entwicklung und Implementierung von CPS liegen in fehlenden Interoperabilitäts- und Referenzarchitekturkonzepten sowie der unzureichend definierten Interaktion von Mensch und CPS begründet [P3, P6, P8][17, 23, 24, 36–40]. Monolithische und proprietäre Informationsund Automatisierungssysteme verhindern die dynamische Vernetzung von Produktionsressourcen, eine flexible Dienstkomposition und das Ausgestalten von CPS [5, 10, 12, 41, 42].

Für die Beherrschung und Betriebsführung von Smart Factories werden modulare und wandlungsfähige Systeme für deren Überwachung benötigt [P6][12, 17, 43–45]. Etablierte Entwurfsparadigmen für Systeme der Zustands- und Prozessüberwachung, wie beispielsweise VDMA 24582 oder ISO 13374, werden vor dem Hintergrund der Emergenz von CPS ineffizient. Grund ist die unzulängliche Unterstützung von maschinellen Lernverfahren und semantischen Interoperabilitätsstandards [46–50]. Modellbasierte Lösungsansätze bieten eine aussichtsreiche Chance zur Auflösung dieser Limitierungen, jedoch wird die manuelle Modellierung von dynamischen Systemen und Produktionsprozessen illusorisch [13, 17, 36, 51–56]. Folglich ist eine fortlaufende Identifikation komplexitätsreduzierter System- und Prozessmodelle sowie deren Nutzung und ergonomische Visualisierung entscheidend, um die Betriebsführung von CPS zu ermöglichen [13, 17, 57].

1

Sozio-cyber-physische Systeme (Sozio-CPS) fokussieren die bidirektionale Interaktion von Mensch und CPS und adressieren diese Problemstellung [P6, P7][23, 58, 59]. Entsprechend ist der Mensch in der Lage mit seinem Wissen und seinen Fähigkeiten die formalisierte Anwendungslogik von CPS strukturiert zu ergänzen [7, 25, 60]. Das Zusammenwirken von Mensch und CPS im Sozio-CPS erfolgt idealerweise über kontextsensitive, plattformunabhängige Mensch-Maschine-Schnittstellen (Human-Machine Interfaces - HMI), die eine Kombination von Daten aus dem Entwicklungsprozess von Maschinen und Anlagen sowie Laufzeitdaten erlauben [P6, P8][7, 17, 61–64].

Gegenstand und Zielstellung dieser Dissertationsschrift ist die Definition von Sozio-CPS in der Domäne der Zustands- und Prozessüberwachung von Smart Factories. Untersucht werden dabei Nutzungsszenarien von Sozio-CPS, die ganzheitliche Formulierung von Systemarchitekturen sowie die Validierung der entwickelten Lösungsansätze in industriellen Anwendungsszenarien. Abgeleitet von der Themenstellung resultiert die Struktur der vorliegenden Dissertationsschrift:

In den Kapiteln 2.1 bis 2.5 wird zunächst der Stand der Technik und Forschung erläutert, indem Einführung und Bewertung von ingenieurund informatikwissenschaftlichen Grundlagen, Methoden und Prinzipien sowie der Interaktion von Mensch und CPS erfolgen. Kapitel 2.6 vertieft den Stand der Forschung, während der Handlungsbedarf in einzelnen Themenfeldern hergeleitet wird. Fokussiert wird dabei auf die Zusammenfassung bzw. Bewertung von Potentialen und Limitierungen wissenschaftlicher Lösungsansätze. Die vorliegende Arbeit erweitert bestehende Untersuchungen um eine Betrachtung der Interaktion von Mensch und CPS. Ein Lösungsweg in Kapitel 3 zeigt auf, wie eine ganzheitliche Vernetzung für die Komplexitätsreduktion und Effizienzsteigerung im beschriebenen Kontext stattfinden kann.

Kapitel 4 synthetisiert unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt *Ressourcen-Cockpit für sozio-cyber-physische Systeme* (S-CPS) ein Sozio-CPS für die modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung von Smart Factories auf Basis des Referenzarchitekturmodells Industrie 4.0 (RAMI4.0) [23]. Einleitend werden Sozio-CPS zu konventionellen CPS abgegrenzt und der Lösungsweg weiterentwickelt. Kapitel 4.1 beinhaltet die Festlegung einer differenzierten Strategie für die Integration von relevanten Entitäten in Sozio-CPS. Es entsteht eine skalierbare Methode zur Datenaggregation und Ressourcenverknüpfung in einem Internet der Dinge und Dienste (Internet of Things and Services - IoTS).

In den darauffolgenden Kapiteln wird die Modellierung eines Gesamtsystems in Abhängigkeit relevanter Nutzergruppen, Systemgrenzen, des Systemkontextes und industrieller Anforderungen vorgenommen. Kapitel 4.2 und 4.3 führen ein Konzept zur modellbasierten Überwachung von CPS ein. Eine Komponente für die webbasierte, dreidimensionale Visualisierung mittels semantischer Interoperabilitätsstandards ist Gegenstand von Kapitel 4.4. Aufbauend werden in Kapitel 4.5 Methoden für die Weiterentwicklung von Diagnosefähigkeiten für CPS durch menschliches Erfahrungswissen definiert. Kapitel 4.6 erweitert die Gesamtsystemarchitektur um einen Lösungsansatz zur Selbstoptimierung in Sozio-CPS. Vorzugsstandards des RAMI4.0 werden konsequent beachtet. Die Gestaltung der Lösungsansätze orientiert sich dabei an *Kruchten* und *Vogel et al.* [65, 66].

Um die praktische Umsetzbarkeit der eingeführten Vorgehensweise zu validieren, wird in Kapitel 5 eine Implementierung in industriellen Anwendungsszenarien durchgeführt und vor dem Stand der Technik und Forschung sowie der Zielstellung beurteilt. Die Unterkapitel legen die Ergebnisse dar und führen die Funktionalitäten der entwickelten Anwendungen auf den Handlungsbedarf im Bereich von Sozio-CPS in Kapitel 2 zurück. In jedem Szenario wird eine Umsetzung und Dienstkomposition auf kontextspezifischen Automatisierungs-, Hard- und Softwaresystemen erläutert. Konkret wird in Kapitel 5.1 die Validierung an einem flexiblen Prüfsystem für elektromechanische Baugruppen beschrieben, während die Implementierung eines Sozio-CPS mittels webbasierter Technologien erfolgt. Kapitel 5.2 fokussiert die Evaluation am Anwendungsbeispiel von mehrspindligen Bearbeitungszentren. Neben der Zustandsüberwachung von Verschleißkomponenten wird die Tauglichkeit der entwickelten Methoden im Anwendungsfall der Überwachung spanender Fertigungsprozesse untersucht. Eine Verwendung im Bereich der Fügetechnologie in Kapitel 5.3 belegt die Übertragbarkeit der Lösungsansätze in die Domäne des Elektromaschinenbaus.

Abschließend werden die maßgeblichen Ergebnisse und Limitationen der Arbeit in Kapitel 6 zusammengefasst sowie einige Ansätze zur Weiterentwicklung und Verwertung aufgezeigt. Bild 1 verdeutlicht den strukturellen Aufbau und die Methodik der vorliegenden Dissertationsschrift.

1 Einleitung und Zielstellung

Kapitel 2 Stand der Technik und Forschung sowie Handlungsbedarf

- Grundlagen und Referenzarchitekturen im Bereich der Industrie 4.0
- Zustands- und Prozessüberwachung in der produzierenden Industrie
- Lösungsansätze im Kontext der Interaktion von Mensch und CPS
- Die Beherrschung der Komplexität in der Zustands- und Prozessüberwachung, Betriebsführung und Instandhaltung ist durch die Erforschung und Definition neuartiger, softwareintensiver Systeme möglich.
- Eine Integration des Menschen in Referenzarchitekturen ist nicht erforscht.
- Die Auflösung der Automatisierungspyramide offeriert neue Möglichkeiten für die Komposition interoperabler Hard- und Softwaresysteme im Bereich der Sozio-CPS.

Kapitel 3 Entwicklung eines Lösungswegs

Kapitel 4 Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme

- Zusammenspiel von Mensch und CPS in der Zustands- und Prozessüberwachung
- Integrationsmodell und Verwaltungsschale f
 ür die Einbindung existierender Systeme
- Anwendungslogik für dezentrale und zentrale Teilsysteme
- Das eingeführte Framework erlaubt die Umsetzung von Sozio-CPS in der Zustands- und Prozessüberwachung.

Kapitel 5 Validierung an industriellen Praxisdemonstratoren

- Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung im Kontext flexibilisierter Prüfsysteme
- Performanzanalyse im Rahmen der Zustands- und Prozessüberwachung von Bearbeitungszentren
- Menschzentrierte Zustands- und Prozessüberwachung von Fügeverfahren im Elektromaschinenbau

Bild 1: Aufbau der vorliegenden Dissertationsschrift

2 Stand der Technik und Forschung

Für die Gestaltung von Sozio-CPS in der modellbasierten Zustands- und Prozessüberwachung ist eine Erarbeitung und Bewertung existierender Grundlagen und Standards notwendig. Den Ausgangspunkt bildet eine umfassende Erläuterung des Begriffs Industrie 4.0 in Kapitel 2.1. RAMI4.0 dient zur Gestaltung von Informations- und Automatisierungssystemen in Smart Factories und bildet einen weiteren Schwerpunkt dieses Kapitels.

Grundlagen sowie Referenzmodelle und -architekturen aus dem Anwendungskontext der Zustands- und Prozessüberwachung werden ergänzend in Kapitel 2.2 evaluiert. Kapitel 2.3 erörtert den Stand der Technik im Bereich Interaktion von Mensch und CPS. Eine systematische Zusammenfassung und Analyse aktueller Lösungsansätze und Forschungsarbeiten im Umfeld der diskutierten Themenfelder wird in Kapitel 2.4 und Kapitel 2.5 thematisiert. Abschließend erfolgt die Darlegung eines Handlungsbedarfs in Kapitel 2.6 und die Beschreibung des Lösungswegs in Kapitel 3. Die Ergebnisse der Literaturrecherche stellen die Basis für wissenschaftlich geprüfte Veröffentlichungen dar [P1–P15]. Teilaspekte wurden in vom Autor betreuten, dissertationsbezogenen studentischen Arbeiten thematisiert [S2-S4, S6, S9-S12, S15, S18, S19, S22, S25-S30].

2.1 Industrie 4.0

Das IoTS verändert den industriellen Sektor mit seinen etablierten Strukturen aus Produktion, Kommunikation und Kollaboration nachhaltig [18, 27, 67–70]. Neue Facetten der Wertschöpfung regen Unternehmen an, Geschäftsprozesse zu prüfen, zu integrieren und neu zu kreieren [1, 71–73].

2.1.1 Transformation der produzierenden Industrie

In Deutschland rangiert die Transformation der produzierenden Industrie unter dem Begriff Industrie 4.0, der im Oktober 2012 offiziell von der deutschen Bundesregierung als Teil der Hightech-Strategie eingeführt wurde [58, 74, 75]. Die vierte industrielle Revolution schließt damit an die ersten drei industriellen Revolutionen an, deren Befähiger die Einführung mechanischer Produktionsanlagen gegen Ende des 18. Jahrhunderts, der Beginn des Taylorismus und die Massenproduktion mit Hilfe elektrischer Energie Anfang des 20. Jahrhunderts und die Automatisierung durch Mikroelektronik gegen Ende des 20. Jahrhunderts umfassten [1, 10, 18, 28, 76–80]. Bild 2 zeigt die Stufen der vier industriellen Revolutionen, die Entwicklungsetappen der Instandhaltung, die qualitative Entwicklung von technischer

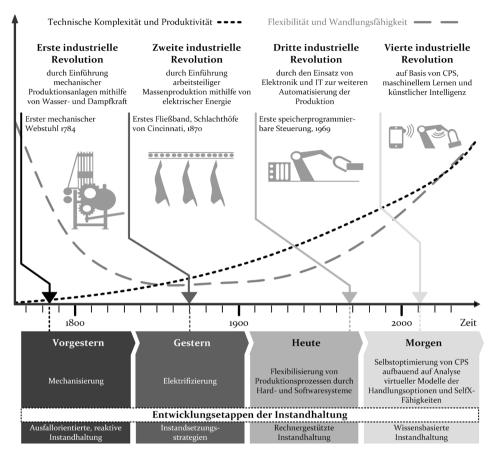


Bild 2: Entwicklung der Instandhaltung gespiegelt an den vier Stufen industrieller Revolutionen, eigene Erweiterung in Anlehnung an [77, 81, 82]

Komplexität und Produktivität sowie die Veränderung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit der Industrieproduktion. Der Bedarf an Referenzarchitekturen und Standards für Smart Factories, die einen Migrationspfad für existierende Produktionssysteme vorsehen, steigt erheblich [10, 18, 34, 58, 74, 80, 83, 84]. Hoher Investitionsbedarf, die Komplexität des Themas, die Störanfälligkeit von Systemen, nicht existierende Standards, eine fehlende Akzeptanz und ein unklarer Nutzen gemäß aktueller Studien zählen zu den Hemmnissen bei der Einführung von technologischen Befähigern der Industrie 4.0 (vgl. Bild 3). Das Anwendungsfeld der Instandhaltung als nicht wertschöpfende Tätigkeit rückt in den Fokus [29, 33, 34, 81]. Im Kontext von Industrie 4.0 umfasst Instandhaltung neben der Aufrechterhaltung des Betriebes und der Sicherung der Verfügbarkeit auch Aspekte der Ressourcen- und Energieeffizienz von Produktionsanlagen sowie Fragestellungen von Geschäftsmodellen [1, 7, 22, 23, 85].

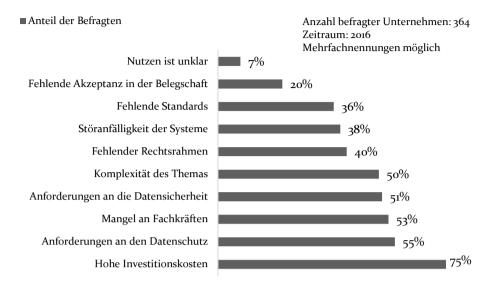


Bild 3: Hemmnisse bei dem Einsatz von technologischen Befähigern der Industrie 4.0, Datenbasis: Industrieunternehmen ab 100 Mitarbeitern (angelehnt an [86])

Es resultiert ein Instandhaltungszyklus, der die stetige Verbesserung von Systemen und die Etablierung eines Kollaborationsnetzwerks zur Bewirtschaftung von Produktionssystemen vorsieht. Bild 4 fasst diesen Instandhaltungszyklus und die Potentiale für die Instandhaltung durch die Paradigmen von Industrie 4.0 zusammen. Impliziert wird ein struktureller Wandel in der Informations- und Automatisierungstechnologie, der Gegenstand des nachfolgenden Kapitels ist.

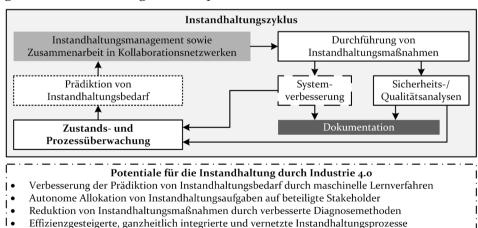


Bild 4: Darstellung eines Instandhaltungszyklus nach den Paradigmen von Industrie 4.0

Kreierung neuer Geschäftsmodelle im Kontext von Smart Factories

2.1.2 Informations- und Automatisierungstechnologie im Wandel

Zusammenfassend ist der Wandel in der Informations- Automatisierungstechnologie Gegenstand umfangreicher Forschungs- und Standardisierungsbestrebungen, die eine Grundlage für die Ausführungen im folgenden Abschnitt darstellen [P2][11, 12, 15, 28, 41, 51, 52, 87-96]. Ein Konzept zur Strukturierung und Umsetzung produktionsspezifischer, automatisierter Systeme ist die Automatisierungspyramide (AP) [28, 88, 97]. Geprägt durch gekoppelte Teilsysteme sowie eine Trennung von Verantwortlichkeiten, stellt die AP Orientierung in Produktionssystemen her [12, 89, 90]. Komponenten sowie Automatisierungssysteme der Feld- und Steuerungsebene zeichnen sich grundsätzlich durch Heterogenität und Inflexibilität aus [1, 89, 90, 94, 98]. Die Forderung nach flexiblen, konfigurierbaren Produktionssystemen ist nur mit einer formalisierten und einheitlichen Anforderungs- und Fähigkeitsbeschreibung von Ressourcen möglich, die bei der strikten Kommunikation in charakteristischen Feldbussystemen der Industrie 3.0 kaum berücksichtigt ist [12, 91, 92, 97]. Daraus folgt eine sukzessive Dekomposition der AP mit ihren hierarchischen Strukturen zugunsten eines dezentral organisierten, flexibel skalierbaren Netzwerks gemäß Bild 5. Einen technischen Lösungsansatz zur Dekomposition und der Realisierung von CPS bietet der Einsatz von serviceorientierten Architekturen (SOA) [93, 99, 100].

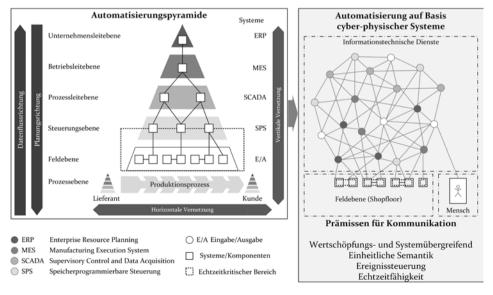


Bild 5: Auflösung der Automatisierungspyramide durch dienstbasierte CPS [12, 15, 98]

Etablierte baumartige Netztopologien werden von vermaschten Netztopologien abgelöst. Deren Teilnehmer sind nicht hierarchisch abhängig, sondern lose gekoppelt, was Vorteile hinsichtlich Erweiterbarkeit, Wiederverwendbarkeit und Wandlungsfähigkeit bietet [P5, P7][S11, S22][12, 33, 101]. Der physische Aufbau der Komponenten auf Feld- und Steuerungsebene mit ihren prozessnahen und echtzeitfähigen Automatisierungsarchitekturen bleibt zur deterministischen und reflektorischen Steuerung von Produktionsprozessen neben den dienstbasierten Kommunikationsmöglichkeiten dennoch bestehen [12, 97]. Dürkop thematisiert die automatische Konfiguration echtzeitfähiger Netzwerke mit Plug and Play - Konzepten und bietet einen zusammenfassenden Überblick über den Stand der Technik in der industriellen Automatisierungs- und Kommunikationstechnologie [102, 103]. Nach Broy und Geisberger stehen CPS für die Verknüpfung von physischer und informationstechnischer Welt [17]. CPS sind mit entsprechender Sensorik und Aktorik in der Lage, eigenständig physische Prozesse zu überwachen, Lernvorgänge, Regelkreise und Berechnungen auszuführen und als Reaktion wiederum physische Prozesse zu beeinflussen [12, 104-107]. Einzelne Teilsysteme im CPS verfügen idealerweise über eine eindeutige Identität und kommunizieren auf Basis einer einheitlichen Semantik [17, 108, 109]. Weiterhin sind CPS gekennzeichnet durch teilweise oder vollständige Autonomie sowie Kooperation mit weiteren Systemen in einem System of Systems und dem Menschen [17, 62, 107, 110]. Bild 6 zeigt die Grundstruktur von CPS nach Gausemeier et al., wobei insbesondere die Applikation von Funktionen zur kognitiven Regulierung im Vergleich zu automatisierten Produktionssystemen der Industrie 3.0 ein entscheidendes Merkmal darstellt [83, 111].

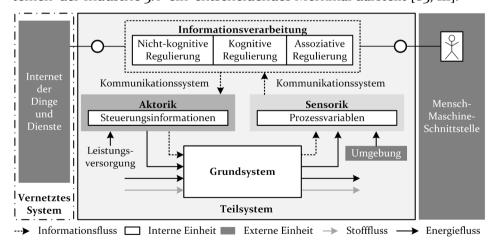


Bild 6: Struktur eines CPS (angelehnt an [111])

Eine bidirektionale Interaktion des Menschen mit diesen Systemen stellt eine Erweiterung dar, die im Rahmen dieser Dissertationsschrift erarbeitet wird. In CPS konvergieren statische, analysierbare Echtzeit- und Steuerungssysteme mit einer festgelegten Funktionalität und internetbasierte Dienste sowie mobile Endgeräte nach dem Gedanken des Pervasive Computings [17, 112, 113]. Es handelt sich um hybride Systeme (HS), die durch eine parallelisierte Architektur heterogener Systemkomponenten, das Zusammenspiel von kontinuierlichen und diskreten Systemen sowie zustandsorientiertes, stochastisches und dynamisches Verhalten gekennzeichnet sind [110, 114, 115]. Von besonderem Interesse ist der Übergang der industriellen Automatisierungstechnologie, die klassischerweise zyklusorientiert auf dem Lesen und Schreiben von Prozessabbildern unter harten Echtzeitbedingungen basiert, hin zur internetbasierten Kommunikation, welche ereignisgetrieben auf einer nur minimalistischen Dienstgütezusicherung beruht [12, 17, 113]. Dabei determinieren zeitdiskrete Signale zur Ansteuerung von Aktorik den Zustand eines physischen Systems, dessen Eigenschaften wiederum in Form von kontinuierlichen Prozessvariablen erfassbar sind [23, 116].

Zur Modellierung, Synthese und Analyse von CPS existieren eine Vielzahl an Paradigmen und Methoden. *Vodenčarević* und *Maier* heben die Bedeutung der Automatentheorie in dieser Disziplin hervor und bieten eine zusammenfassende Darstellung verschiedenartiger Zustandsautomaten [115, 117]. Hybride Automaten erweitern vordergründig das Konzept der deterministischen, endlichen Automaten (Deterministic Finite Automaton - DFA) um kontinuierliche Prozessvariablen und sind für die Abbildung von CPS geeignet [S22][110, 114, 115, 118, 119]. Ergänzend existieren Methoden für die Beschreibung von hybriden Systemen als spezielle Form von Petrinetzen oder Bondgraphen [115, 120–123].

Die Integration zeitlicher und stochastischer Aspekte ermöglicht eine umfassende Charakterisierung eines hybriden Systems in Form eines stochastischen, deterministischen, hybriden Automaten (SDHA) in Anlehnung an die Definitionen von *Vodenčarević*, *Maier* und *Henzinger* [114, 115, 117]. Ein stochastischer, deterministischer, hybrider Automat wird als Tupel $SDHA = (S, s_0, \Sigma, T, \Delta, P, X, \Theta)$ definiert, wobei:

- *S* beschreibt einen endlichen Satz von Zuständen, s₀ ∈ S sei der Ausgangszustand.
- Σ repräsentiert das Alphabet. Dessen Elemente entsprechen Symbolen, die Transitionen zwischen den Zuständen auslösen.

- $T \subseteq S \times \Sigma \times S \times \Delta$ beschreibt eine endliche Menge an Transitionen. Eine Transition $\tau \in T$ ist ein Tupel (s, a, s', δ) mit $s \in S$ als Vorgängerzustand, $s' \in S$ als Folgezustand, $a \in \Sigma$ als auslösendes Symbol, $\delta \in \Delta$ als zeitliche Beschränkung und Δ als Menge an zeitlichen Beschränkungen.
- $\delta \in \Delta \subseteq \{\delta = [t_1, t_2] : t_1, t_2 \in \mathbb{N}\}$ beschreibt eine endliche Menge von Zeitbeschränkungen einer Transition. Zeitliche Beschränkungen $\delta \in \Delta$ bezeichnen die Verweilzeit in einem Zustand, bevor eine Transition aufgetreten ist.
- P ist eine Menge von Wahrscheinlichkeitsfunktionen mit den Elementen $p: S \times (\Sigma \cup \{\lambda\}) \times S \times \Delta \to \mathbb{Q} \cap [0,1]$. P enthält Transitionswahrscheinlichkeiten und die Wahrscheinlichkeit λ , dass eine Zeichenkette in einem Zustand endet.
- \mathcal{X} ist eine endliche Menge an Uhren, die den kontinuierlichen Zeitfortschritt darstellen. Der Wert einer Uhr v_t ist definiert durch $v_t(x) \colon \mathcal{X} \to \mathbb{N}$, während $x \in \mathcal{X}$ gilt.
- θ bildet eine Menge an Funktionen bestehend aus den Elementen $\theta_s \colon \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^m, \forall s \in S, n, m \in \mathbb{N}. \ y = \theta_s(t,u)$ repräsentiert die Funktion, die Wertänderungen der Ausgangssignale $y \in Y$ mit dem Zustand s basierend auf dem Zeitpunkt t und Werten des kontinuierlichen Eingangssignals $u \in U$. U bezeichnet eine Menge an kontinuierlichen Signalen, während Q eine Menge an diskreten Signalen repräsentiert.

Trotz der Verfügbarkeit von Entwurfsparadigmen ist im praktischen Entwicklungsprozess das Verhalten und der Zustandsraum von CPS aufgrund dynamischer Modell- und Systemintegration nur eingeschränkt vorherbestimmbar. Auslöser ist deren emergentes Verhalten, das ein spontanes Herausbilden von Strukturen und Eigenschaften eines Systems durch gemeinsames Wirken seiner Elemente beschreibt [12, 17, 110, 124]. Folglich können durch die Kombination der verschiedenen Komponenten neue, nicht a priori geplante Systeme entstehen, die eine Herausforderung für Systeme der Zustands- und Prozessüberwachung und die bedarfsgerechte Gestaltung von komplexitätsreduzierenden HMI bedeuten [104, 106, 110].

Bezogen auf Industrie 4.0 verspricht die Vernetzung autonomer, konfigurierbarer und räumlich verteilter Produktionsressourcen mit Planungsund Steuerungssystemen zu CPS die Flexibilität, Effizienz und Robustheit der Produktion bei weiterhin hohem Qualitätsniveau zu verbessern [2, 10, 12, 17]. Die Möglichkeit, CPS auf Basis semantischer Technologien und SOA zu orchestrieren, führt zu adaptiven Produktionssystemen, die als cyber-physische Produktionssysteme (CPPS) bezeichnet werden [62, 97, 104, 125–127]. Self-X-Fähigkeiten erlauben die Selbstkonfiguration in Form des Plug and Produce-Konzepts, das eine Rekonfiguration von Produktionsanlagen im Falle veränderter Anforderungen oder unvorhergesehener Zustände zulässt [13, 19, 26, 93, 102, 103, 125, 128-130]. Weiterhin existieren Lösungsansätze für die Selbstoptimierung und Zustandsüberwachung produktionstechnischer Systeme [7, 13]. Schließlich zeichnen sich CPPS idealerweise durch eine komplexitätsreduzierende Benutzerinteraktion aus, die aber unzureichend definiert ist [10, 61, 127]. Im Vergleich zu konventionellen Automatisierungssystemen sind CPPS sowohl durch offene, internetbasierte Kommunikation als auch durch geschlossene, deterministische Kommunikation wie in Feldbussystemen, gekennzeichnet [12, 97, 131]. Aufgrund der verschiedenen Einsatzmöglichkeiten eröffnet sich ein heterogenes Forschungsgebiet, das sich mit einer Vielzahl von Anforderungen, Potentialen, Technologien, System- und Referenzarchitekturen auseinandersetzt [17, 23, 104, 132].

2.1.3 Referenzmodelle und -architekturen

Die Entwicklung ganzheitlicher CPS erfordert eine Definition von Lösungsansätzen in den Domänen der Informations-, Automatisierungs- und PLM-Systeme [10, 17]. Entlang der drei Dimensionen Hierarchie (Hierarchy), Verlauf (Life Cycle & Value Stream) und Architektur (Layers) bietet RAMI4.0 einen Lösungsraum für die Systemgestaltung [133]. RAMI4.0 ist Thema einer Vielzahl wissenschaftlicher und normativer Arbeiten, die gesamtheitlich eine Grundlage für nachfolgende Ausführungen darstellen [26, 39, 40, 51, 91, 131, 133–135]. Weiterhin sind Vorzugsstandards in RAMI4.0 empfohlen, die einen Ausgangspunkt für diese Forschungsarbeit darstellen [51, 131, 134]. In senkrechter Richtung gliedert sich die Dimension *Layers* in sechs Schichten, welche die Sichtweise der Informationstechnologie repräsentieren [51, 131, 133]. Eine detaillierte Beschreibung dieser Dimension in Tabelle 1 dargestellt. Die Betrachtung von Entitäten über deren gesamten Lebenszyklus hinweg bietet vor dem Hintergrund von Industrie 4.0 hohes Verbesserungspotential und ist daher in einer eigenen Dimension Life Cycle & Value Stream berücksichtigt. Der Entwurf der International Electrotechnical Commission (IEC) 62890 zum Life Cycle Management unterscheidet dabei grundlegend zwischen einem Typ (Type), der mit der Produktidee am Anfang der Entwicklung beginnt und nach Prototypenbau mit der Freigabe zur Serienproduktion endet, und einer sich daran anschließenden Instanz (Instance).

Tabelle 1: Beschreibung der RAMI4.0-Dimension Layers, eigene Aufstellung in
Anlehnung an [51, 131, 133, 134, 136, 137]

Layer	Beschreibung
Asset	Repräsentation der physischen Welt und des Menschen sowie Anbindung der Assets an die Integrationsschicht.
Integration	Bereitstellung der Repräsentation realer Assets, beispielsweise mit Hilfe von Radio Frequency Identification (RFID)-Lesegeräten. Die Integration des Menschen erfolgt mithilfe geeigneter HMI.
Communication	Vereinheitlichung der Kommunikation unter Verwendung eines einheitlichen Datenformats in Richtung des Information Layer.
Information	Laufzeitumgebung für die Ereignisverarbeitung sowie Bereitstellung strukturierter Daten über Dienstschnittstellen.
Functional	Bereitstellung einer Laufzeit- und Modellierungsumgebung für Funktionen und Dienste zur Unterstützung von Geschäftsprozessen.
Business	Orchestrierung von Funktionen und Diensten des Functional Layer sowie Abbildung der Geschäftsmodelle und -prozesse.

Neben der eigentlichen Entwicklung und Produktion sind jeweils die Instandhaltung und Nutzung von Typ sowie Instanz berücksichtigt. Die Achse *Hierarchy* widmet sich den Funktionalitäten und Verantwortlichkeiten der Digitalen Fabrik (Digital Factory – DF). Ausgehend von IEC 62264 und IEC 61512 ist diese Dimension eine Erweiterung der AP um das Produkt selbst am unteren Ende sowie die vernetzte Welt an der Spitze der Modelldimension [S13, S17, S22][51, 131, 133, 134, 136–138].

RAMI4.0 unterliegt jedoch Einschränkungen, die einen Ausgangspunkt für Weiterentwicklungen darstellen. Vordergründig wird der Forschungsbedarf nach einem Framework für die Realisierung und Ausführung von Wertschöpfungsnetzwerken identifiziert [109]. Es bestehen Defizite in der Darstellung und Ausführung von Verhaltensmodellen dedizierter CPS sowie bei der Modellierung der Interaktion von CPS und Mensch [17, 133, 139]. Domänenorientierte Konzepte zur Modellierung von Produktionsressourcen und Dienstleistungen, Methoden und Lösungen zum Aufbau einer flexiblen und wandlungsfähigen Produktion bleiben unberücksichtigt [133]. Für die Beschreibung von Produkten existiert mit eCl@ss ein Vorzugsstandard in RAMI4.0, der jedoch weiterentwickelt werden muss, um Gemeinsamkeiten und Unterschiede von Produkten und auch Dienstleistungen vollständig zu beschreiben [109]. Flatt führt eine methodische Analyse der IT-Sicherheit von Industrie 4.0-Technologien auf Basis von RAMI4.0 durch [46, 140]. Postuliert wird die Notwendigkeit von übergreifenden Sicherheitsarchitekturen, da Aspekte der IT-Sicherheit entlang der drei

Dimensionen nur unzureichend einbezogen sind. Weiterhin besteht Handlungsbedarf in der Darstellung juristisch-technischer Abhängigkeiten. Einen Lösungsansatz stellt Ju-RAMI4.0 dar [141]. Grundsätzlich wird der Mensch in RAMI4.0 nur als Asset betrachtet. Eine Interaktion mit anderen Entitäten ist über die Integrationsschicht vorgesehen [133]. Die Definition umfassender Interaktionsstandards, erweiterter und standardisierter HMI ist für das strukturierte Zusammenwirken von Mensch und CPS notwendig. Differenzierte Methoden zur Einordnung von Systemen der Zustands- und Prozessüberwachung in RAMI4.0 sind ebenfalls nicht verfügbar. Funktionalitäten der Zustandsüberwachung werden dem Integration Layer allgemein als zusätzliche Funktion zugeordnet [142]. Neben RAMI4.0 befinden sich vergleichbare Referenzarchitekturen im wissenschaftlichen Diskurs, wie die Industrial Internet Reference Architecture (IIRA) [39, 143, 144]. Während RAMI4.0 den Schwerpunkt auf die Industrieproduktion legt, bietet IIRA Einsetzbarkeit und konkrete Umsetzungsempfehlungen, verzichtet jedoch auf die Definition von Vorzugsstandards [51, 131]. Die IIRA setzt sich aus den Viewpoints Business, Usage, Functional und Implementation zusammen [39, 142, 143]. Während Analogien in der Abbildung von Funktionen vorliegen, ist ein Unterschied in dem eindimensionalen Aufbau von IIRA begründet [143]. Bild 7 setzt die Layer von RAMI4.0 mit dem Viewpoint Functional in Beziehung. Für die weitere Umsetzung und die Herstellung von semantischer Interoperabilität ist das Konzept der I4.oK VS verfügbar, das im nächsten Kapitel eingeführt wird.

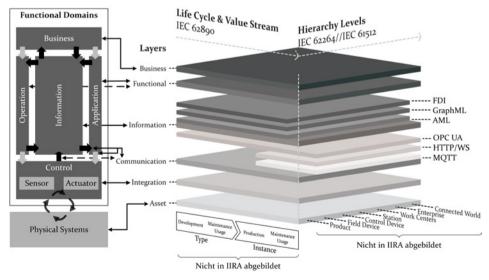


Bild 7: Referenzarchitekturmodell für Industrie 4.0 sowie Industrial Internet Reference Architecture (angelehnt an [142])

2.1.4 Semantische Interoperabilität

Zur Herstellung von semantischer Interoperabilität in CPS spezifiert die I4.oK Eigenschaften von Teilsystemen genauer. Der Container, der diese Eigenschaften und Funktionalitäten bereitstellt, ist die VS, die nach der Modellvorstellung mit zugehörigen Gegenständen zur I4.oK verbunden ist (vgl. Bild 8) [51, 131, 145]. Umfangreiche Vorarbeiten befinden sich im wissenschaftlichen Diskurs und stellen die Grundlage für die folgenden Ausführungen dar [17, 33, 36, 39, 40, 51, 71, 91, 109, 131, 134, 145–147].

Die VS unterscheidet – wie ein Asset der DF – zwischen einem *Header* und einem *Body*. Der Kopfbereich *DF Header* sorgt anhand einer Merkmalsliste für die Identifikation eines konkreten Gegenstands sowie der VS selbst. Konkret werden unter *Gegenständen* aktive Komponenten eines Produktionssystems wie Maschinen, Automatisierungs-, Software- oder Logistiksysteme aber auch passive Komponenten, wie Produkte oder Maschinenkomponenten verstanden [S13, S22, S27][51, 147, 148]. Im *DF Body* befindet sich der *Komponenten-Manager*, der einzelne *Teilmodelle* innerhalb der VS verwaltet. Dabei verfügt jedes *Teilmodell* über eine hierarchische Struktur, in der Merkmale individuelle Daten und Funktionen referenzieren. Die Gesamtheit der Merkmale bildet das *Manifest*, das ein eindeutiges Inhaltsverzeichnis der in der VS verfügbaren Daten und Funktionen darstellt. Eine Merkmalsstruktur kann in einem *strengen, einheitlichen Format* dargestellt werden, während Daten und Funktionen in unterschiedlichen, sich ergänzenden Formaten vorliegen.

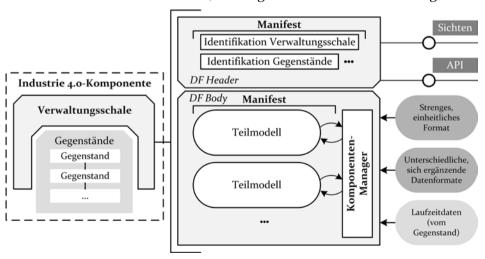


Bild 8: Struktur von Industrie 4.o-Komponenten und Verwaltungsschalen (angelehnt an [147])

Nach außen nimmt die VS *Laufzeitdaten* von einem *Gegenstand* auf und bildet diese mit Hilfe divergierender *Sichten* ab. Hierbei soll eine Schnittstelle zur Anwendungsprogrammierung (Application Programming Interface – API) Dienste des *Komponenten-Managers* zur Verfügung stellen [S22, S27][51, 109, 131, 145, 147, 148].

Verfügbar ist weiterhin ein Interaktionsmodell für I4.oK, das sich in eine objekt- und protokollorientierte Architektur unterteilt [139, 149]. Die Realisierung von I4.oK bzw. VS wird im Projekt open Asset Administration Shell (openAAS) thematisiert, dessen Ziel die Ausgestaltung einer Referenzimplementierung der VS zur Verbindung von konzeptionellen und normativen Inhalten sowie der praktischen industriellen Umsetzung ist [150–152]. Weiterhin existiert mit dem CPPS-Befähiger von Schlechtendahl ein vergleichbarer Lösungsansatz [S22, S27][153].

Der Entwurf der VS ist für die Umsetzung und Etablierung von CPPS bedeutend, unterliegt jedoch Limitierungen, die einen Ausgangspunkt für weitere Forschungsarbeiten darstellen. Beispielsweise wird kein *Teilmodell* für eine einheitliche Abbildung der Funktionalitäten modellbasierter Zustands- und Prozessüberwachung entwickelt.

Aspekte der Zeitsynchronisation und Echtzeitfähigkeit über nicht echtzeitfähige Netzwerke und Ausfallsicherheit sind für die praktische Nutzung ebenfalls nicht vollständig definiert. Konnektivität steht im wissenschaftlichen Diskurs oftmals im Vordergrund. Tatsächlich sind jedoch Fragestellungen der Applikation maschineller Lernverfahren oder die Abbildung von Self-X-Eigenschaften für die Umsetzung von CPPS bedeutend. Entwicklungswerkzeuge, die eine effiziente Identifikation, Generierung, Verifizierung und Verteilung von VS erlauben, sind ebenfalls nicht etabliert [P6][109, 147].

Die VS fokussiert bisher auf eine objektorientierte Beschreibung der Informationen und Funktionen zugeordneter Komponenten [131, 147]. Möglichkeiten zur Darstellung des zu erwartenden Komponenten- und Interaktionsverhaltens sind unzureichend eingeführt [109]. Der im Rahmen dieser Dissertationsschrift adressierte Handlungsbedarf im Bereich VS wird in Kapitel 2.6 vertieft. Mit Automation Markup Language (AML) für Anlagenplanungsdaten und Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA) für die Feldgeräteintegration soll im Folgenden auf zwei Vorzugsstandards von RAMI4.0 eingegangen werden, die aufgrund ihrer flexiblen Einsetzbarkeit von hoher Bedeutung für diese Dissertationsschrift sind [154–156].

Open Platform Communications Unified Architecture

Ein Lösungsansatz für die Vernetzung unterschiedlicher Systeme in der Informations- und Automatisierungstechnologie ergibt sich aus Kommunikationsstandards, die Aspekte der semantischen Interoperabilität unterstützen [157–159]. Mit OPC UA ist ein Standard für den SOA-basierten Informationsaustausch verfügbar, der die Möglichkeit zur Abbildung und Kommunikation von einheitlichen Informationsmodellen bietet (vgl. Anhang) [160]. In DIN (Deutsches Institut für Normung) EN (Europäische Norm) 62541 sind die Erweiterungen Data Access (DA), Alarms and Conditions (AC), Historical Access (HA) sowie Programs (Prog) spezifiziert, die für eine Implementierung notwendige Definitionen beinhalten [161–164].

Zur Realisierung einheitlicher Informationsmodelle existieren Companion Specifications, die ein Indikator für die domänen- und herstellerübergreifende Akzeptanz von OPC UA sind und eine wichtige Grundlage für die Entwicklung von VS darstellen [160, 165, 166]. RAMI4.o-Vorzugsstandard ist die OPC UA-basierte Integrationstechnologie Field Device Integration (FDI) [167]. OPC UA hebt sich damit von konkurrierenden Lösungsansätzen wie dem Kommunikationsstandard Message Queue Telemetry Transfer (MOTT) ab [168]. Weiterhin sind datenpunktgenaue Zugriffsrechte und zertifikatsbasierte Verschlüsselung Teil des Funktionsumfangs [S₃, S₁₁, S₂₂, S₂₄, S₂₇][160, 169–171]. Eine im Zuge dieser Forschungsarbeit durchgeführte Untersuchung der Fähigkeiten und Limitierungen von Kommunikationsstandards wurde bereits veröffentlicht [P2]. Die Ergebnisse umfassen eine Zusammenfassung von Anforderungen an Kommunikation und Datenaustausch in Industrie 4.0 auf Basis einer Inhaltsanalyse sowie den Abgleich der ermittelten Anforderungen mit den Eigenschaften ausgewählter technologischer Befähiger. Bild 9 zeigt die im Kontext dieser Arbeit eingesetzte OPC UA-Architektur.

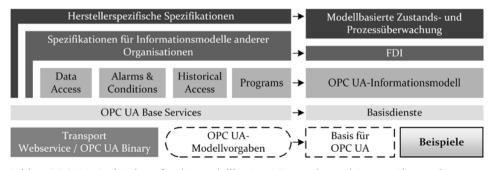


Bild 9: OPC UA-Architektur für die modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung, eigene Erweiterung in Anlehnung an [160]

Neben einem FDI-kompatiblen Informationsmodell sind Erweiterungen für eine modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung berücksichtigt. OPC UA bietet die Möglichkeit, Datenpunkte unter Verzicht auf zyklisches Abfragen von Wertänderungen (Polling) zu überwachen. Der Standard dient der Abbildung CPS-spezifischer Self-X-Fähigkeiten und bildet die Grundlage für die effiziente Durchführung von Initialisierungsvorgängen. Im Gegensatz zu industriellen Kommunikationsstandards wie Process Field Network (PROFINET) besitzt OPC UA jedoch keine deterministischen Echtzeiteigenschaften. Kritische Regelungs- und Steuerungsaufgaben sind folglich nur eingeschränkt umsetzbar. In Form des Time Sensitive Networking (TSN)-Kommunikationsstandards existieren Bestrebungen, diese Limitation aufzulösen und eine definierte Echtzeitkommunikation zu realisieren [P6][S22, S24, S27] [160, 169, 170].

Automation Markup Language

Neben Aspekten der IoTS-Kommunikation sind statische Datenformate für die Realisierung von Smart Factories und Sozio-CPS von Bedeutung. AML stellt gemäß DIN EN 62714 einen RAMI4.o-Vorzugsstandard zur Beschreibung, zum übergreifenden Datenaustausch und zur Bildung eines Teilmodells für Anlagenplanungsdaten in der VS dar [26, 51, 131, 133, 172–175].

Das hierarchische Rahmenformat von AML ist das Extensible Markup Language (XML)-basierte Computer Aided Engineering Exchange (CAEX), mit dessen Hilfe die Topologie zu modellierender Systeme beschrieben wird [176–179]. Die Abbildung von Steuerungslogik und Prozessabläufen ist dagegen im Datenformat Programmable Logic Controller open XML (PLCopen XML) formalisierbar [179, 180]. Dreidimensionale Geometrie und Kinematik werden über das Datenformat COLLAborative Design Activity (COLLADA) eingebunden [181]. Zudem können weitere Dokumente referenziert werden [182]. Für die Harmonisierung der Informationsmodelle von OPC UA und AML existiert eine Companion Specification [183–185]. Bild 10 visualisiert den Aufbau einer AML-Repräsentation.

Stellvertretend für eine Vielzahl anderer Forschungsprojekte im Umfeld von AML hat das Projekt SecurePLUGandWORK den Anspruch, existierende Plug and Produce-Konzepte um Aspekte der Informationssicherheit, Authentifizierung, Modellintegration, Konsistenzprüfung und Schlüsselverwaltung zu erweitern. Bei der Lösungsspezifikation erfolgt die konsequente Nutzung von RAMI4.o-Vorzugsstandards für die Beschreibung von Anlagen und Komponenten sowie für die technische Realisierung der IoTS-Kommunikation [186, 187].

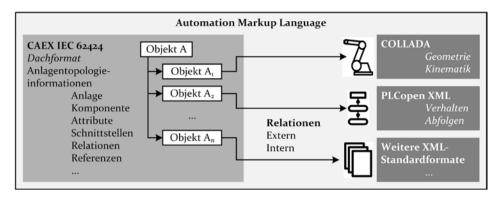


Bild 10: Struktur einer AML-Repräsentation (angelehnt an [179, 188])

2.2 Zustands- und Prozessüberwachung

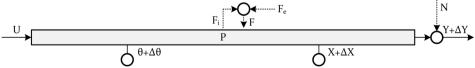
Systeme zur Zustands- und Prozessüberwachung sind Befähiger für zustandsorientierte und vorausschauende Instandhaltung mit dem Zweck, die Verfügbarkeit von CPPS sicherzustellen [26, 189]. Weck, Brecher und Binner grenzen die Begriffe Zustands-, Prozess- und Maschinenüberwachung ab. Wesentliche Überwachungsstrategien und Sensorprinzipien sind ähnlich und auf vergleichbaren Systemarchitekturen abbildbar [190, 191]. Zustandsüberwachung bezieht sich im Kontext der vorliegenden Dissertationsschrift auf die Überwachung von physischen Gegenständen, während sich die Prozessüberwachung auf Produktionsprozesse und die Qualitätsüberwachung auf hergestellte Produkte fokussiert. Im Folgenden werden Definitionen aus dem Stand der Technik und Forschung für die Begriffe Fehler, Anomalie und Fehlererkennung eingesetzt [192, 193].

2.2.1 Grundlagen

Zustandsüberwachung wird im Sinne der Inspektion in die drei *Teilschritte Zustandserfassung, Zustandsvergleich* und *Diagnose* unterteilt [189, 194]. Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose nach *Michl* erlauben Wissensmanagement sowie eine Hilfestellung bei Ursachenanalyse, Therapie und Lösungsfindung [195]. *Zöllner* und *Hake* fokussieren die Diagnose in der Elektronikproduktion bzw. von automatisierten Montageanlagen und bieten Lösungsansätze für standardisierte Systemarchitekturen [196, 197]. Weitere Teilschritte umfassen Erstellung, Simulation und Prüfung von Fehlerhypothesen [54, 198]. Diagnoserelevantes Wissen ist mittels Ontologien strukturier- und klassifizierbar und unterstützt eine einheitliche maschinelle Interpretation sowie semantische Interoperabilität [199, 200]. *Yuan* differenziert zwischen datengetriebenen, wissensbasierten und analytischen Diagnosemethoden [201].

Ziel der vorausschauenden Instandhaltung ist es, die Restlebensdauer einer Komponente präzise zu prognostizieren. Von Relevanz ist die Methode der Restlebensdauerprognose, die auf Grundlage von Diagnose- und Zustandsmerkmalen, Schadensgrenzen, Inspektionszeitpunkten und Streubereichen der Restlebensdauer sowie dem Zusammenhang zwischen Zustandsmerkmal und Betriebsdauer bzw. festgelegter Grenzwerte einen verbleibenden Abnutzungsvorrat prognostiziert [81].

Neben der Zustandsüberwachung von Maschinen und Anlagen ist die Überwachung von industriellen Produktionsprozessen von hoher Relevanz [190]. Synthetisierbar ist ein Schema für einen Prozess, das der Lösungsspezifikation in dieser Dissertationsschrift dient [47–50, 54, 113, 193, 198, 202]. Grundsätzlich wandelt ein Prozess P definierte Eingangsvariablen U in Ausgangsvariablen Y um. Dabei determinieren zeitlich veränderliche Eingangssignale U(t), wie beispielsweise Steuerungsinformationen, messbare Ausgangssignale Y(t), wie Prozessvariablen. Trotz des Einsatzes von durchgängigen Entwicklungsmethoden in der Produkt- und Prozessentwicklung können Abweichungen zwischen formalem Prozessmodell und einer realen Prozessinstanz auftreten. Es sind zwei Arten von Fehlern F unterscheidbar. Interne Fehler Fi entstehen ohne äußere Einflüsse im Prozess, wie beispielsweise Verschleißerscheinungen. Ursache für externe Fehlereinflüsse F_e können Temperaturänderungen und unzureichende technische Sauberkeit darstellen. Diese zeitlich variierenden Fehler beeinflussen interne Prozessparameter θ um den Betrag $\Delta\theta(t)$, wie mechanische Steifigkeit oder elektrischer Widerstand. Neben den direkt auf den Prozess wirkenden Fehlern sind Unsicherheiten in Form von Messungenauigkeiten N Teil des Konzepts, die zu Abweichungen ΔY führen. Ziel einer Prozessüberwachung ist es schließlich, anhand der beobachtbaren Größen U und Y auf die internen Prozessparameter θ und interne Prozesszustände X bzw. deren Abweichungen ΔX zu schließen und somit Erkenntnisse über den Prozesszustand bzw. Parameter zu gewinnen. Zusammenfassend ist in Bild 11 ein Prozess mit relevanten Parametern, Zuständen und Einflussgrößen schematisch dargestellt.



P: Prozess F: Fehler Fe: Fehlereinfluss extern Fi: Fehlereinfluss intern N: Messungenauigkeit U: Eingangsvariablen X: Prozesszustand intern ΔX: Abweichung Prozesszustand intern ΔY: Abweichung Ausgangsvariablen Y: Ausgangsvariablen θ: Prozessparameter intern

 $\Delta\theta$: Abweichung Prozessparameter intern

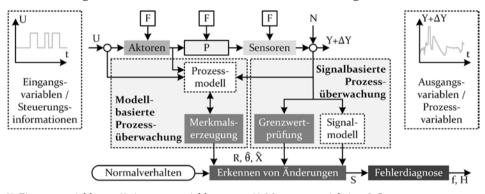
Bild 11: Schema eines Prozesses (angelehnt an [193])

2.2.2 Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung

Der Umgang mit Modellen nimmt im Kontext der modellbasierten Zustands- und Prozessüberwachung, der Informationsmodellierung, des Systementwurfs und der Lernalgorithmen eine entscheidende Rolle ein [P3, P6][13, 17, 115]. Dabei werden observierbare Prozessvariablen und Steuerungsinformationen mit einem durch ein Modell formalisiertes Verhalten abgeglichen [193]. Box, Lunze und Stachowiak präsentieren eine umfassende Analyse und Systematisierung des Modellbegriffs. Zentral ist die Festlegung des Abbildungsmerkmals, des Verkürzungsmerkmals und des pragmatischen Merkmals. Folglich stellt nicht die akkurate Abbildung der Originale, sondern die Identifikation der für Zustands- und Prozessüberwachung relevanten Bestandteile das Ziel der Modellbildung im Rahmen dieser Dissertationsschrift dar [113, 203, 204].

Isermann differenziert zwischen White-, Grey- und Black Box-Modellen [S29][54, 193, 198]. White Box-Modelle umfassen eine detaillierte Beschreibung von Eigenschaften und Zusammenhängen auf Basis von Prozess- und Expertenwissen. Die manuelle Erstellung von White Box-Modellen ermöglicht die präzise Abbildung des Verhaltens einer Produktionseinheit. Notwendig ist eine arbeitsintensive Modellierung von Prozessen und ihrer Wirkbeziehungen innerhalb eines Systems unter Nutzung von Expertenwissen [13, 115, 117]. Im Hinblick auf die Komplexität von dynamisch orchestrierten CPPS, die aus einer Vielzahl an vernetzten Teilsystemen bestehen, verhindert der daraus resultierende Modellierungsaufwand und das notwendige Expertenwissen eine konsequente Anwendung und Aktualisierung von manuell erstellten White-Box-Modellen [P6][125, 205]. Anlagen-, Prozess- und Konfigurationsänderungen entlang des Lebenszyklus sowie Plug and Produce-Szenarien gemäß Kapitel 2.1.2 verschärfen diese Situation zusätzlich [103, 129, 163]. Im Fall der Grey Box-Modelle sind theoretische Gesetzmäßigkeiten bekannt, jedoch müssen interne Modellparameter durch Messung der Ein- und Ausgangsvariablen experimentell bestimmt werden [193]. Black Box-Modelle beschränken sich auf die Formulierung von beobachtbarem Schnittstellenverhalten. Eine Modellbildung findet hier vollständig durch die experimentelle Bestimmung von Zusammenhängen erfasster Ein- und Ausgangsvariablen statt. Auch im Fall des Black Box-Modells sind Vorkenntnisse in Form von a priori-Wissen bezüglich der Modellstruktur notwendig. Dieses Wissen wird unter anderem zur Auswahl und Parametrisierung eines geeigneten Lernalgorithmus vorausgesetzt [54, 193]. Vorteilhaft ist, dass maschinelle Lernverfahren die automatisierte, datengetriebene Identifikation von Black Box-Modellen zur

Laufzeit von CPPS erlauben [13, 117]. Im Zuge der modellbasierten Zustands- und Prozessüberwachung können Prozessvariablen, Steuerungs- und Zeitinformationen in Abhängigkeit des Anwendungsfalls für die Modellbildung und einen Zustandsvergleich berücksichtigt werden [113, 193, 198]. Finden signifikante Abweichungen statt, werden diese als Anomalien für die Fehlerdiagnose bereitgestellt [14, 113]. Bild 12 fasst die Schemata signal- und modellbasierter Fehlererkennung zusammen.



U: Eingangsvariablen Y: Ausgangsvariablen N: Messungenauigkeit S: Symptome R: Residuen f: Fehlerbeschreibungen \widehat{X} : Prozesszustandsschätzung P: Prozess F: Fehler H: Handlungsanweisungen $\widehat{\theta}$: Prozessparameterschätzung ΔY : Abweichung Ausgangsvariablen

Bild 12: Parallelisierte Nutzung von modell- und signalbasierter Prozessüberwachung für die Fehlerdiagnose (angelehnt an [113, 198])

2.2.3 Maschinelles Lernen

Mit Hilfe der Methoden des maschinellen Lernens können Gesetzmäßigkeiten und Strukturmuster in Daten und Informationen identifiziert werden, um Wissen zu generieren. So können beispielsweise Automatenmodelle oder künstliche neuronale Netze (KNN) das Ergebnis einer Lernaufgabe darstellen. Ein lernendes System besitzt Schnittstellen zur Umwelt, über das es die Folgen getroffener Entscheidungen wahrnehmen kann (vgl. Bild 13). Durch passive Beobachtung oder aktive Bereitstellung von Daten und Informationen kann es die aktuelle Situation erfassen und eine Wissensbasis bzw. das interne Modell modifizieren. Im Anschluss an eine durchgeführte Iteration soll die Komponente Lerner eine auf die Zielvorgabe hin optimierte Lösung ausgeben. Mit Hilfe der Zielvorgabe, der aktuellen Situation und der Wissensbasis wird im Performanz-Element die Aufgabenstellung bearbeitet und die gefundene Lösung weitergeleitet. Das Lern-Element evaluiert die gefundene Lösung und vergleicht diese mit der zu bearbeitenden Problemstellung. Die daraus erlangten Erfahrungen werden in der Wissensbasis persistiert [206–209].

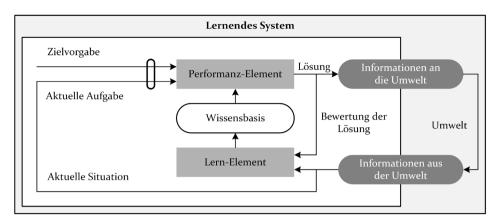


Bild 13: Struktur eines lernenden Systems (angelehnt an [206])

Im Kontext der vorliegenden Dissertationsschrift sind unüberwachte und überwachte Lernverfahren von hoher Relevanz. Im Fall des unüberwachten Lernens bestehen keine a priori Kenntnisse über Ähnlichkeiten oder Muster in den zu analysierenden Daten. Die Lernaufgabe befasst sich mit der Identifikation von Gruppen und Mustern [207, 210]. Ein Trainingsdatensatz, der in Form und Ausprägung den zu analysierenden Daten und Prozessen entspricht, wird im Rahmen des überwachten Lernens mit Zielwerten erweitert Lernens mit Zielwerten erweitert [209, 210]. Im Fall der Klassifizierung wird die Einteilung einer Datenmenge in diskrete Klassen angestrebt, während im Bezug auf die Regression eine Abbildung von kontinuierlichen Zusammenhängen zwischen den Dimensionen der Merkmalsvektoren und Zielwerten thematisiert ist [206, 210, 211].

Methoden des maschinellen Lernens nehmen zur automatisierten Identifikation verschiedenartiger Zustandsautomaten eine entscheidende Rolle ein. Grundsätzlich wird hierbei angenommen, dass ein Teilsystem bzw. ein Prozess observierbare, endliche, diskrete und unterscheidbare Zustände aufweist [13, 117, 209, 212, 213]. Tabelle 2 fasst hierfür verfügbare Lernalgorithmen zusammen. Für die Bewertung der untersuchten Lernalgorithmen wurde ein Kategoriensystem entwickelt, das nachfolgend erläutert wird. *Modell* repräsentiert das identifizierte Automatenmodell des jeweiligen Lernalgorithmus. Neben dem SDHA sind der deterministische endliche Zustandsautomat (Deterministic Finite Automaton - DFA), der deterministische zeitbehaftete Zustandsautomat (Deterministic Timed Automaton - DTA), der stochastische deterministische endliche Zustandsautomat (Stochastic Deterministic Finite Automaton - SDFA) sowie der stochastische deterministische zeitbehaftete Automat (Stochastic Deterministic Timed Automaton - SDTA) von Bedeutung [115].

Tabelle 2: Lernalgorithmen für unterschiedliche Arten von Zustandsautomaten, eigene Aufstellung in Anlehnung an [S28][55, 115, 117]

Lern- algorithmus	Modell	Zustandsvereinigung / Zustandsseparation	Online / Offline	Komplexität
ALERGIA [115, 214, 215]	SDFA	Ja	Offline	O(n³)
BUTLA [115, 117, 214]	SDTA	Ja	Offline	O(n³)
HyBUTLA [55, 115]	SDHA	Ja	Offline	O(n³)
MDI [115, 214, 216]	SDFA	Ja	Offline	$O(n^2)$
OTALA [117, 214]	DTA	Nein	Online	$0(2^n)$

Zustandsvereinigung bzw. Zustandsseparation stellen Kriterien für die Vereinigung bzw. Separation von Zuständen zur Reduktion der Komplexität dar. Entsprechend Kapitel 2.1.2 ist die Definition von Kompatibilitätskriterien für die Vereinigung und Separation von Zuständen ein Kernproblem [205]. Eine Unterscheidung erfolgt bezüglich des Zeitpunkts der Identifikation, der entweder zur Laufzeit des zu modellierenden Systems (Online) oder auf der Grundlage gespeicherter Daten stattfindet (Offline) [117]. Die Komplexität eines Lernalgorithmus wird in Landau-Symbolen dargestellt [115, 117]. Das Laufzeitverhalten ist von unterschiedlichen Kriterien abhängig. Im Fall von HyBUTLA sind beispielsweise das Konzept des Prefix Tree Acceptor (PTA) oder im Fall von OTALA die Anzahl diskreter Steuerungssignale bzw. -informationen maßgeblich [S28][115, 214].

Im Rahmen dieser Dissertationsschrift stellt der Algorithmus Online Timed Automaton Learning Algorithm (OTALA) zur Modellbildung eine Ausgangsbasis dar [117, 214]. OTALA beschreibt ein Verfahren zur passiven Identifikation von DTA auf Basis von unüberwachtem Lernen. Hier repräsentiert ein Vektor aus zeitdiskreten Steuerungssignalen den Zustand eines zu modellierenden Systems. Der Wechsel des Zustands wird durch die Änderung von Steuerungssignalen ausgelöst. Die Einrichtung und Validierung von Verfahren des maschinellen Lernens bzw. der Zustands- und Prozessüberwachung erfordert Expertenwissen [117].

Es besteht ein Bedarf an Referenzmodellen und -architekturen, die eine standardisierte Umsetzung im Spannungsfeld zwischen Informations- und Automatisierungstechnologie erlauben [217, 218].

2.2.4 Referenzmodelle und -architekturen

Die Umsetzung modellbasierter Zustands- und Prozessüberwachung ist innerhalb eines Produktionssystems mit hohem Aufwand verbunden. Insbesondere Individual- und Insellösungen verschiedener Hersteller mit uneinheitlichen Kommunikationsschnittstellen, Systemarchitekturen und Datenstrukturen erschweren deren Implementierung [P6, P8, P14][S15][18].

Zur Lösung dieses Problems sind Referenzmodelle und -architekturen verfügbar, die einen Ausgangspunkt dieser Dissertationsschrift darstellen. VDMA 24582 definiert einen Gestaltungsleitfaden für die feldbusneutrale Umsetzung der Anwendungslogik von Condition Monitoring Systemen (CMS) in industriellen Automatisierungssystemen [219, 220]. Ein Entwurf für die Implementierung der Blockschnittstellen in OPC UA unterstützt den Aufbau entsprechender VS [219, 220]. Neben VDMA 24582 behandelt ISO 13374 Aspekte der Verarbeitung, Kommunikation und Visualisierung von Daten in CMS [47-50]. Das Ziel ist die Herstellung von Interoperabilität durch Modularisierung von Systemstrukturen [48, 49]. Bezüglich der konkreten Realisierung eines standardisierten Daten- und Kommunikationsschemas für das Condition Monitoring (CM) verweist ISO 13374 auf die offenen Standards des Maintenance Information Open System Alliance (MIMOSA)-Verbunds [202, 221]. Mittels der graphischen Modellierungssprache Unified Modeling Language (UML) und der Auszeichnungssprache XML spezifiziert MIMOSA im Standard Open System Architecture for Condition-Based Maintenance (OSA-CBM) eine Architektur für CMS. Eine zugehörige OPC UA Companion Specification erlaubt die Strukturierung von modellbasierten Systemen der Zustandsund Prozessüberwachung [222].

Vor dem Hintergrund der Themenstellung ist zu prüfen, inwieweit VDMA 24582 und ISO 13374 in Kombination für die Anwendung in SOAbasierten CPPS geeignet sind [S15]. Wichtige Aspekte sind dabei die Möglichkeiten zur modularen, dezentralen Verteilung von CM-Funktionalitäten, die Flexibilität mit der die Informationsverarbeitung an veränderte Topologien angepasst werden kann sowie die Unterstützung von CPSspezifischen, kontinuierlichen Optimierungs- und Lernprozessen. Maßgebend zur Verbesserung der Fehlerdiagnose ist des Weiteren die enge Einbindung des Menschen in den Monitoring-Prozess unter Nutzung seiner kognitiven Fähigkeiten. Beide Referenzarchitekturen verfolgen den Ansatz der Kapselung von Funktionen in modularen Blöcken mit einheitlichen Schnittstellen. ISO 13374 ist durch einen hohen Abstraktionsgrad gekennzeichnet und überlässt somit dem Anwender Gestaltungsfreiraum in der Umsetzung. Die Vorgehensweisen zur Gliederung der Funktionsblöcke

spiegeln sich in der Strukturierung der Anwendungslogik wieder. Während VDMA 24582 die Zustandsüberwachung nach den funktionalen Strukturen eines Produktionssystems organisiert, differenziert ISO 13374 zwischen den Schritten im Prozess der Informationsverarbeitung [48, 49, 219, 220].

Die Herangehensweisen bezüglich der Strukturierung von Funktionsblöcken offerieren die Möglichkeit, eine funktionale Struktur entsprechend der VDMA 24582 und die Überwachung einzelner Systemkomponenten nach ISO 13374 zu kombinieren. Hohe Flexibilität der funktionalen Struktur wird für die Überwachung emergenter CPPS vorausgesetzt. VDMA 24582 realisiert eine hierarchische Zuordnung von CM-Funktionalitäten zu Komponenten der AP. ISO 13374 thematisiert dagegen die verteilte Verarbeitung von CM-Daten mit einem höherem Abstraktionsgrad und sieht keine hierarchische Zuordnung vor.

Für die Anwendung in einem CPS muss die Zustandsüberwachung effizient an veränderte Systemtopologien anpassbar sein. ISO 13374 umfasst neben Parameteranpassung erweiternd die Option, über die Konfigurationsschnittstelle eines Funktionsblocks auch dessen Algorithmen bzw. interne Anwendungslogik zu ändern. Während die untersuchten Standards Kriterien der Informationsbereitstellung durch kontextbezogene Visualisierungen beinhalten, werden Abläufe zur Integration von Erfahrungswissen der menschlichen Bediener zur kontinuierlichen Verbesserung der Diagnosefunktionalität nicht fokussiert. Zusammenfassend ist der Vergleich in Tabelle 3 dargestellt. Die bisher eingeführten Grundlagen im Bereich Industrie 4.0 sowie der Zustands- und Prozessüberwachung ergänzend. wird im nachfolgenden Kapitel der Stand der Technik und Forschung im Bereich Sozio-CPS erarbeitet.

Tabelle 3: Vergleich von VDMA 24582 und ISO 13374, eigene Aufstellung in Anlehnung an [P14][S15][47-50, 219, 220]

Vergleichskriterium	ISO 13374	VDMA 24582
Modularität	Prozessschritte	Funktionsblöcke
CM-Struktur	Prozedural gegliedert	Funktional gegliedert
Hardwarezuordnung	Freie Verteilung	Gefordert
SOA-Unterstützung	Gegeben	Eingeschränkt
Anpassbarkeit	Parameter und CM- Algorithmen	Parameter
Einbindung Mensch	Informationsbereitstellung	Informationsbereitstellung

2.3 Sozio-cyber-physische Systeme

CPS, RAMI4.0 und I4.0K bilden eine Grundlage für die Umsetzung von Smart Factories [10, 75, 223]. Arbeitsbedingungen zeichnen sich für den Menschen durch gezielte Mensch-Roboter-Kollaboration, Leistungsbewertung, Rollenmodelle, mitarbeiterzentrierte Informationssysteme und Adaptivität aus [10, 25, 26, 32, 33, 35, 51, 61, 97, 224–229].

Eine Ausgangsgrundlage stellt das Konzept der sozio-technischen Systeme dar, das Arbeitssysteme mit engem Zusammenspiel von Mensch und Technik bezeichnet. Dabei unterliegt das sozio-technische System strategischen und normativen Vorgaben (vgl. Bild 14) [60]. Die Einbindung des Menschen und die Art der Integration wird in Termini wie Socio-Cyber-Physical System [230, 231], Cyber-Physical-Social System [232–234], Physical-Cyber-Social Computing [235] oder Joint Cognitive System [236] adressiert. Alle Lösungsansätze unterstützen die Forderung nach kontextsensitiven HMI, die sich in Abhängigkeit zu erfüllender Aufgaben, veränderter Produktbzw. Kundenanforderungen sowie zu überwachender Komponenten, Prozesse und Umweltbedingungen anpassen.

Vroom und Horvath postulieren eine Angleichung an Kultur, Normen oder Wertvorstellungen des Nutzers [231]. Atzori et al. binden physische Geräte in soziale Netzwerke ein, um eine erweiterte Interaktion zwischen Mensch und Maschine herzustellen. Nach dieser Modellvorstellung sind Objekte in der Lage, Daten über sich zu speichern, sich zu überwachen und ggf. in einem Web of Things zu kommunizieren [237]. Im industriellen Zusammenhang untersuchen Frazzon et al. die globale Vernetzung von Produktionsnetzwerken in Sozio-CPS und deren Auswirkungen auf die Entscheidungsfindung in der Produkt- sowie Prozessentwicklung [230, 238].

Wang definiert Cyber-Physical-Social Systems als eine Gelegenheit die Entscheidungsfindung zu verbessern. Mit der Abbildung künstlicher Organisationen und Systeme ist die Simulation von Entscheidungen möglich [232]. Jones et al. untersuchen die Rolle des Menschen in intelligenten technischen Systemen. Der Mensch nimmt hier zur Erhöhung der Robustheit, Resilienz und Leistungsfähigkeit eine kritische Rolle ein. Auf dem Begriff Joint Cognitive System aufbauend wird ein System definiert, das charakterisiert ist durch physische und kognitive Interaktionen sowie die Integration von Menschen, Maschinen und Organisationen [239]. Nguyen präsentiert einen simulations- und rollenmodellbasierten Ansatz, der die aus Sozio-CPS entstehenden Herausforderungen entlang von Produktlebenszyklen analysiert [240].

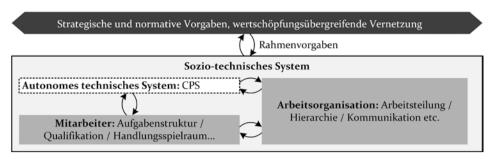


Bild 14: Zusammenspiel von CPS und Mitarbeitern im Rahmen sozio-technischer Systeme (angelehnt an [60])

Ergänzend zu den Lösungsansätzen aus dem Stand der Technik und Forschung zeigt Bild 15 die Entwicklung hin zu einem Sozio-CPS. Ein Sozio-CPS ist hier eine Teilmenge des Internets der Dinge, Daten, Dienste und Menschen, während das Thema dieser Dissertationsschrift eine Schnittmenge von CPPS und Sozio-CPS darstellt.

Windelband und Dworschak unterscheiden im Hinblick auf die Entwicklungsrichtungen von Industrie 4.0 zwischen einem Automatisierungsszenario und einem Spezialisierungsszenario [229, 241]. Die Potentiale zur Effizienzsteigerung im Stand der Technik fokussieren evolutionäre Verbesserungen, beispielsweise bieten Assistenzsysteme Möglichkeiten zur Verringerung von instandhaltungsbedingten Stillstandszeiten [195, 228, 242].

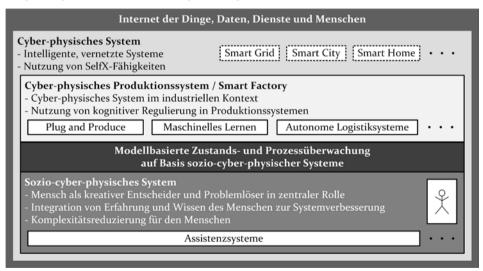


Bild 15: Einordnung der Forschungsarbeit in angrenzende Themenfelder (angelehnt an [10, 17])

In diesem Kontext adressiert das Konzept der Autonomation die Übertragung von Funktionalitäten der Zustands-, Prozess-, und Oualitätsüberwachung auf eine Maschine. Das Tätigkeitsfeld des Menschen verschiebt sich auf die Instandhaltung. Ein Mitarbeiter wird primär im Fall von relevanten Abweichungen und Ereignissen benötigt [243, 244]. Endgeräte aus dem Bereich der virtuellen Realität (Virtual Reality) und erweiterten Realität (Augmented Reality) in Kombination mit angepassten Bedienmethoden besitzen Potential zur Effizienzsteigerung in der Betriebsführung [11]. Jedoch ist die Erstellung von HMI für die Bedienung bzw. Zustands- und Prozessüberwachung von Produktionsanlagen mit manuellem Aufwand verbunden [245]. Hinsichtlich einer effizienten, automatisierten Generierung von HMI existieren Lösungsansätze in der Domäne der kontinuierlichen Produktion bzw. Prozessindustrie, die eine einheitliche Semantik für die Integration von Feldgeräten in Prozessleitsysteme anbieten [246, 247]. Hier stellt das Konzept Decentralized Intelligence for Modular Plants (DIMA) eine Methodik für die Integration, Verknüpfung und Visualisierung modularer Prozess- und Visualisierungseinheiten dar [248]. Ahmad et al. bieten eine Möglichkeit für die automatisierte Generierung von HMI basierend auf Simulationsmodellen in einem Integrated Engineering Tool [249]. Abschließend führt Hobscheidt eine Methode zur ganzheitlichen, soziotechnischen Leistungsbewertung ein [226].

2.4 Stand der Forschung

Die Relevanz der Themenstellung dieser Dissertationsschrift wird durch eine Vielzahl von Forschungsarbeiten im Umfeld der Industrie 4.0 sowie der Zustands- und Prozessüberwachung bestätigt. Verfügbare Lösungsansätze umfassen ein Spektrum von der Grundlagenforschung bis hin zur anwendungsorientierten Entwicklung und können in die drei Kategorien Systemintegration, Herstellung von Wandlungsfähigkeit und Applikation maschineller Lernverfahren eingeteilt werden. Bezüglich der Systemmodellierung wird auf den Standard Fundamental Modeling Concepts (FMC) zurückgegriffen, der insbesondere bei der Definition von Systemen, die sich im Spannungsfeld zwischen Informations- und Automatisierungstechnologie befinden, Vorteile durch passende Diagrammtypen bietet (vgl. Anhang) [250, 251].

2.4.1 Lösungsansätze zur Systemintegration

Zum Zweck der Systemintegration nutzen van Tan et al. das Konzept eines aggregierenden Servers, der Informationen aus mehreren untergeordneten OPC UA-Servern bzw. OPC Classic-Servern zusammenführt (vgl. Bild 16).

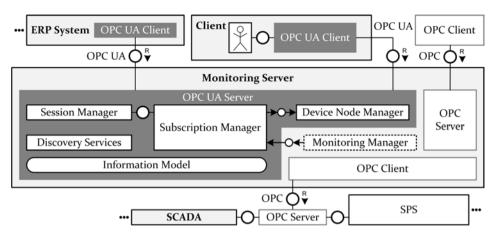


Bild 16: Konzept eines Monitoring Servers auf Basis aggregierender OPC UA Server nach van Tan et al. (angelehnt an [252])

Anwendungsdomäne des überwachenden Monitoring Server ist die Verarbeitung von Daten aus Prozessleitsystemen und speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) sowie deren Weitergabe an übergeordnete Systeme (Monitoring Manager). Neben generischen Bestandteilen von OPC UA (Session Manager, Subscription Manager, Device Node Manager, Information Model) werden Suchdienste (Discovery Services) zur Identifikation relevanter Server-Endpunkte unterstützt. Die Integration weiterer Kommunikationsstandards sowie ein umfänglicher Lösungsansatz für die Datenpersistierung sind allerdings nicht Teil des vorgestellten Konzepts [252]. Hästbacka et al. ergänzen den Entwurf des Aggregationsservers um die Integration weiterer Kommunikationsstandards (Bluetooth) und E/A-basierte Kommunikation (*Terminal für Datenerfassuna*) (vgl. Bild 17). Mithilfe von Systemadaptern, die Informationen aus verschiedenen Quellen (Monitoring System A bzw. Monitoring System B) in eine standardisierte Datenstruktur überführen, können Aggregationsserver übergeordneten Systemen eine einheitliche Sicht auf die Datengrundlage bieten. OPC UA und der MIMOSA-Standard OSA-CBM dienen dabei der Herstellung von Interoperabilität. Caching-Mechanismen erlauben weiterhin die Zwischenspeicherung entlang der Aggregationshierarchie im Fall instabiler Kommunikationsverbindungen bzw. Bandbreitenlimitierungen. Neben der Interoperabilität sind Verwaltung und Verknüpfung verfügbarer Dienste entscheidend. Das vorgeschlagene Konzept sieht daher eine flexible Orchestrierung von CM-Prozessen und Diensten zu ganzheitlichen Anwendungen vor. Jeder Dienst setzt sich wiederum aus Anwendungen zusammen, wodurch eine Implementierung spezifischer Anwendungslogik möglich ist [99, 222, 253-255].

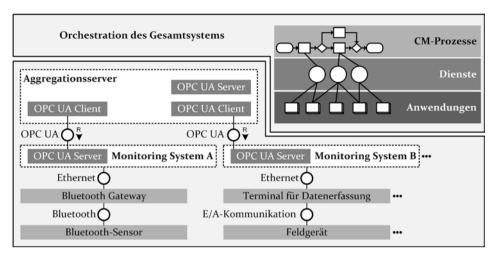


Bild 17: Aggregation von Daten verschiedener Monitoring-Systeme mittels eines OPC UA-Servers nach Erl und Hästbacka et al. (angelehnt an [99, 222, 253–255])

Das Integrationssystem von Seilonen et al. fokussiert die effiziente Datenund Informationszusammenführung (vgl. Bild 18). Integrierte Monitoring-Informationen einzelner Anlagen werden kohärent und dienstbasiert im IoTS offeriert. Erhält das Integrationssystem eine Anfrage über eine Open System Architecture for Enterprise Application Integration (OSA-EAI)-Schnittstelle, beginnt eine Kompositionslogik auf Basis einer Maschinenbezeichnung relevante Daten zu akquirieren. Das Verzeichnis Common Interoperability Registry (CIR) stellt systemspezifische Endpunkte einer Anlage unter einer globalen Bezeichnung bereit. Zur Harmonisierung unterschiedlicher Datenformate und Kommunikationsstandards sind entsprechende Schemaübersetzer und Kommunikationsprotokolladapter verfügbar [256].

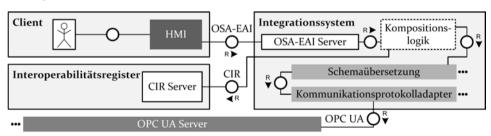


Bild 18: Integrationssystem für die Zusammenführung verschiedener Teilsysteme nach Seilonen et al. (angelehnt an [256])

2.4.2 Lösungsansätze zur Herstellung von Wandlungsfähigkeit

Vergleichbar zum Ansatz von Seilonen et al. ist die PLANTCockpit-Systemarchitektur von Dennert et al. (vgl. Bild 19) [257, 258]. Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Lösungsansätzen zur Datenzusammenführung wird explizit der Aufbau von Daten- und Informationsverarbeitungslogik diskutiert. Nach IEC 61499 sind die Aufgaben der Daten- und Informationsverarbeitung in Blöcken gekapselt, Adapterblöcke integrieren Daten externer Systeme, bevor Funktionsblöcke die Schritte der Daten- und Informationsverarbeitung durchführen [259]. Ebenso wie bei der Lösung von Seilonen et al. kommunizieren Funktionsblöcke untereinander mittels XML-formatierter Nachrichten. Statt eines Request/Response-Schemas wird eine Publish/Subscribe-Kommunikation etabliert. Zur Verbreitung von Nachrichten zwischen den Funktions- und Adapterblöcken wird ein Message Broker eingesetzt.

Während die zur Laufzeit aktiven Funktionen der Informationsverarbeitung durch die Funktionsschicht zusammengefasst werden, ist die Datenhaltung Aufgabe der Datenpersistenz und Persistenzschicht. Eine Visualisierungsschicht kommuniziert erzeugte Daten sowie Struktur und Konfiguration der Datenverarbeitung in einem einheitlichen Format unter Nutzung einer Dienstumgebung an entsprechende HMI in der Präsentationsschicht bzw. Präsentationsumgebung. Verfügbar sind weiterhin Exportschnittstellen, ein Baustein- sowie Funktionsblock-Browser. Funktionsund Adapterblöcke der Funktionsschicht stellen Instanzen abstrakt definierter Klassen dar, während eine Aktualisierung und Auflösung durch die Blockverwaltung durchgeführt wird [257, 258].

Sreenuch et al. definieren eine Softwarearchitektur, die in der Organisation ihrer Daten- und Informationsverarbeitung einen zu Dennert et al. vergleichbaren Ansatz verfolgt (vgl. Bild 20). Deren Architektur unterstützt die Umsetzung des Blockmodells von ISO 13374 [47–50]. Hierfür wird der Standard OSA-CBM eingesetzt, der einer Implementierung von ISO 13374 durch den MIMOSA-Verbund entspricht [221, 260]. Ziel des Frameworks für OSA-CBM-Module ist die vereinfachte Einrichtung verteilter CMS und die Förderung der Wiederverwendbarkeit von Komponenten. Funktionsblöcke kommunizieren analog zu Dennert et al. ereignisgesteuert mit Hilfe eines Publish/Subscribe-Mechanismus sowie eines Blackboards. Ein Blackboard dient als gemeinsamer Datenspeicher und benachrichtigt zugeordnete Funktionen bei einer Änderung relevanter Ein- und Ausgangsdaten.

In diesem Kontext besitzen Funktionsblöcke einen generischen Grundrahmen und werden zur Laufzeit anhand einer Konfiguration initialisiert. Ein- und Ausgangsfunktionen führen eine vor- bzw. nachgelagerte Datenverarbeitung aus. Hinsichtlich des Austauschs von Datenereignissen unter den OSA-CBM-Modulen nutzen Sreenuch et al. eine Middleware für den agentübergreifenden Methodenaufruf (Datenereignis-Empfänger bzw. Datenereignis-Sender). Caching-Mechanismen dienen der Pufferung von Daten und damit der Vermeidung des Verlustes von Daten bei hoher Kapazitätsauslastung [260].

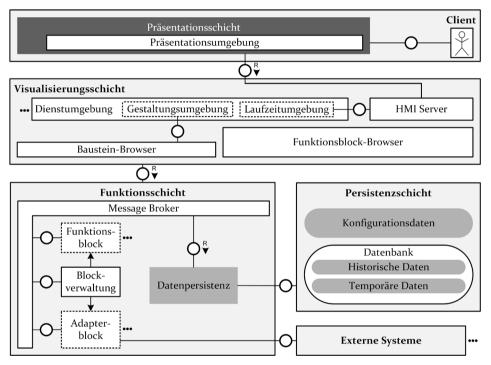


Bild 19: Systemarchitektur aus dem Projekt PLANTCockpit nach Dennert et al. (angelehnt an [257, 258])

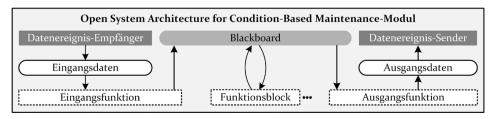


Bild 20: Struktur eines OSA-CBM-Moduls nach Sreenuch et al. (angelehnt an [260])

2.4.3 Lösungsansätze zur Applikation maschineller Lernverfahren

Bisher betrachtete Systemarchitekturen sehen keine Möglichkeit für die stetige Verbesserung von Anwendungslogik durch maschinelles Lernen vor. Im Kontrast dazu bindet *Binner* den Menschen in die Zustandsbewertung ein. Ein *Fachkonzeptserver* verfolgt den Ansatz, mehrere Methoden der Zustandsüberwachung parallelisiert auszuführen und kombiniert somit die Vorteile einzelner Verfahren. KNN innerhalb der Aggregationslogik fassen die Zustandsbewertungen der einzelnen Verfahren zu einer klassifizierten Aussage zum Anlagenzustand zusammen. Eingaben des Instandhaltungspersonals werden als Zielwerte genutzt, um ein KNN für die Aussagengenerierung fortlaufend zu trainieren.

Weitere Bestandteile sind eine *Netzwerksteuerung* für die Datenakquise von *Datenquellen* sowie eine *Datenbanksteuerung* zur Datenpersistierung (*Relationale Datenbank*). Gespeichert werden vorverarbeitete *Eingangsdaten* (*Datenvorverarbeitung*), aggregierte Daten (*Aggregationslogik*) sowie *Ausgangsdaten* aus den *Bewertungsverfahren*. Die Rückkopplung für den Lernprozess ist durch browserbasierte Formulare umgesetzt, durch den die Einordnungen des Instandhaltungspersonals in einen Referenzzustand überführt werden (vgl. Bild 21). Lernalgorithmen für Automatenmodelle, Referenzarchitekturkonformität, die Weiterverwendung von PLM-Daten für die HMI-Generierung und Aspekte semantischer Interoperabilität sind nicht Bestandteil dieser Forschungsarbeiten [191].

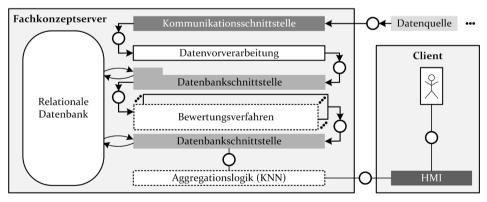


Bild 21: Framework für die Aggregation von Zustandsbewertungen nach Binner (angelehnt an [191])

Niggemann et al. stellen ein System für die Überwachung von CPS vor, das Aspekte des maschinellen Lernens in eine zentralisierte Plattform integriert (vgl. Bild 22) [57]. Eine Zustandserfassung findet auf Basis einer Big Data-Plattform statt, die analog zu den bisher behandelten Ansätzen Eingangsdaten um Konfigurationsdaten und weitere Metadaten anreichert. Für die Abbildung von Methoden des maschinellen Lernens ist ein Lerner definiert. Aufgabe der Konzeptschicht ist die Ergänzung der Ergebnisse des Lerners mit domänenspezifischem Wissen. Somit erstellt diese Schicht mögliche Diagnosen und Handlungsanweisungen, die rollenspezifisch an das Aufgabenfeld und den Einsatzort der menschlichen Benutzer angepasst sind. Weiterhin zerlegt die Konzeptschicht abstrakte Befehle des Instandhaltungs- und Maschinenbedienpersonals in konkrete Maßnahmen, die von der Schicht Adaption ausgeführt werden. Fragestellungen der Verbesserung von Diagnosefähigkeiten durch die Integration menschlichen Wissens, der Verteilung von Anwendungslogik zwischen dezentralen und zentralen Systemen, Referenzarchitekturkonformität, sowie Aspekte der semantischen Interoperabilität sind nicht Bestandteil dieser Lösung.

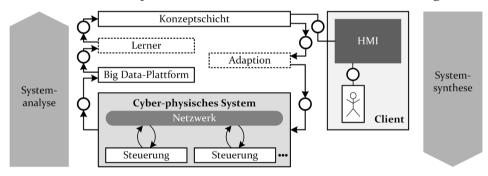


Bild 22: Architektur für die Überwachung cyber-physischer Systeme nach Niggemann et al. (angelehnt an [57])

2.5 Zusammenfassung

Aufbauend auf dem Stand der Technik erfolgt in diesem Kapitel eine Zusammenfassung relevanter Dissertationen und Forschungsprojekte im Umfeld der eingeführten Themengebiete. *Michl* und *Göhringer* stellen webbasierte Lösungsansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose vor [195, 261]. Fokussiert werden die Potentiale von browserbasierten 3D-Visualisierungen, Experten- und Agentensystemen sowie Wiki-Systemen zur Anlagendiagnose. Die Definition referenzarchitekturkonformer Systeme und von Konzepten zur ganzheitlichen Überwachung hybrider CPPS durch eine Nutzung von Lernalgorithmen bleibt allerdings aus.

Aspekte der semantischen Interoperabilität durch die Nutzung entsprechender Standards sind ebenfalls unberücksichtigt. Während *Maier* Lernalgorithmen für die Identifikation von DTA erforscht, ergänzt *Vodenčarević* die Betrachtung um Lernalgorithmen für die Abbildung von Prozessvariablen bzw. kontinuierlicher Modelle und stochastischem Verhalten [115, 117]. Ergänzend bietet *Merten* Verfahren zur aktiven Identifikation von Automatenmodellen, deren Implementierung umfassend beschrieben wird [262].

Gössling offeriert einen Lösungsansatz zur Beschreibung von Feldgeräten. Ein effizienter Datenaustausch in der Automatisierung, unter anderem im Anwendungsfeld vorausschauender Instandhaltung und Zustandsüberwachung, wird unterstützt [263].

Kohl untersucht die automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexiblen Fabrik. In diesem Zusammenhang wird ein Messsystem entwickelt, das über ein erweiterbares semantisch interoperables Informationsmodell verfügt und die Datengrundlage für simulationsbasierte Energieflexibilitätsmaßnahmen schafft. Ausblickend wird ein *Statusüberwacher* eingeführt, der eine teilprozessspezifische Überwachung von Elektrizitätssignalen in der Zeitdomäne erlaubt (vgl. Bild 23). Eine ganzheitliche, modellbasierte Analyse sowie die Nutzung von Lernalgorithmen erfolgt nicht [264].

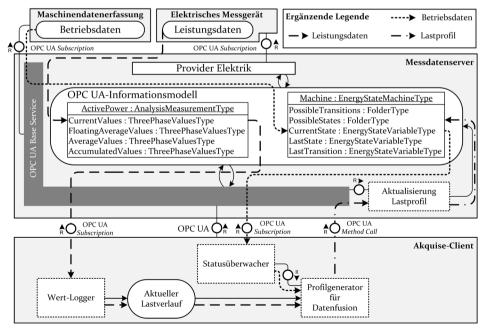


Bild 23: Architektur eines Messsystems für eine Energiesimulation auf Basis von Energieund Maschinendaten nach Kohl (angelehnt an [264])

Die Prozess- und Energieeffizienzoptimierung von Robotereinheiten auf der Grundlage mechatronischer Simulationen fokussiert Parvanto [265]. Reidt entwickelt eine ganzheitliche Referenzarchitektur für integrierte Informationssysteme im Bereich der Instandhaltung auf Basis der Ergebnisse des Projekts S-CPS entlang des 4+1-Sichtenmodells nach Kruchten [P8][24, 66, 266]. Der Referenzarchitekturbegriff wird umfassend und technolgieneutral diskutiert, eine Fokussierung auf die Vorzugsstandards von RAMI4.0 erfolgt nicht. Diskutiert werden unter anderem die Module Handlungsleitfäden, Wiki, Wartungs- und Dokumentenmanagement, Fehlererkennung, Zustandsüberwachung sowie vorausschauende Instandhaltung, welche Horbach und Trommler in einem Ressourcen-Cockpit prototypisch implementieren und validieren [P8, P9][266, 267]. Ergänzend definiert Wächter eine Engineering-Methode zur Gestaltung von tangiblen HMI für die Entwicklung von Produktionsassistenzsystemen [268]. Der Teilaspekt der modellbasierten Zustands- und Prozessüberwachung nimmt in diesen Beiträgen eine untergeordnete Rolle ein.

Beetz definiert ein arbeitsplatzintegriertes Assistenzsystem am Beispiel der Formmesstechnik und diskutiert Aspekte des Wissensmanagements [269]. Eine Referenzarchitektur und informationstechnische Schnittstellen im Kontext der Lean Production thematisiert Kolberg [44]. Masan untersucht das Konfigurationsmanagement im Kontext der Instandhaltungsanalyse und offeriert Lösungsansätze im Bereich der modellbasierten Zustandsund Prozessüberwachung [270]. Die Entwicklung eines Konzepts zur Gestaltung eines Franchise-Produktionssystems, welches technische, organisatorische und strategische Inhalte umfasst, untersucht Rauch [45]. Rov thematisiert die Gestaltung cyber-physischer Logistiksysteme, während Werner eine Methode zur Realisierung störungstoleranter Sensorsysteme beschreibt [271, 272]. Westermann führt eine Referenzarchitektur, ein Reifegradmodell, Hilfsmittel zur Konzipierung von CPS und abschließend ein Vorgehensmodell zur Realisierung von CPS im Maschinen- und Anlagenbau ein [273]. Im Bereich der Erforschung und Entwicklung semantisch einheitlicher Informationsmodelle definiert Mertens ein Metamodell zur Verwaltung merkmalsbasierter Informationen. Eingeführte Modelle dienen zur Beschreibung technischer Anlagen während verschiedener Lebensphasen wie Planung, Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung. Die Umsetzung in einem operativen Merkmalsystem erlaubt den rollen- und dienstbasierten Datenzugriff [274].

Tabelle 4 vergleicht Forschungsarbeiten im Hinblick auf Aspekte der Systemarchitektur, der eingesetzten Validierungsszenarien, der Zustandsund Prozessüberwachung sowie der Mensch-Integration. Weiterhin sind

Projekte mit Lösungsansätzen im Bereich der modellbasierten Zustandsund Prozessüberwachung auf Basis von Sozio-CPS verfügbar. Tabelle 5 stellt eine Einordnung und Bewertung der Projekte anhand relevanter Kriterien im Rahmen einer Expertenschätzung dar. Die tabellarische Eingruppierung, Kriterienbildung und Bewertung wurde durch die Analyse von Projektveröffentlichungen, Informationen von Förderträgern und beteiligten Forschungseinrichtungen durchgeführt. Zugrundeliegende Bewertungskriterien entsprechen im Wesentlichen den bisher untersuchten Themenbereichen der vorliegenden Dissertationsschrift ergänzt durch den Aspekt des Produktionstyps.

Tabelle 4: Einordnung, Bewertung und Abgrenzung von Forschungsarbeiten im Kontext der Dissertationsschrift

Name	Systemarchitektur Validierungs- szenarien Zustands- und Prozessüber- wachung		Prozessüber-	Mensch- Integration
Binner [191]	Definition einer Systemarchitektur für die mensch- zentrierte Zustands- und Prozess- überwachung	Werkzeug- maschinen	Modell- und signal- basierte Zustands- und Prozessüberwa- chung	Verbesserung von Diagnosefähigkei- ten durch Berücksichtigung menschlicher Ein- gaben
Göhringer [261]	Definition einer Systemarchitektur für die Telediagnose von Produktions- systemen	Werkzeug- maschinen	Modellierung und Überwachung von hybriden Systemen	Erweiterte Benutzerintegration bei Therapieauswahl und Wissensakquise
Gössling [263]	Definition einer Systemarchitektur für die Erstellung von Ontologien	Theoretische Validierung anhand von Performanz- metriken	Erstellung eines Feldgeräteprofils für CM-Anwendungen	Unterstützung von Experten durch teilautomatisierte Erstellung von Modellen für Auto- matisierungsgeräte
Kohl [264]	Definition dienst- basierter Mess- systeme unter Beachtung semantischer Aspekte sowie Datenintegration in eine Ablauf- simulation	Prüfsysteme, Gießereien, Simulations- anwendungen	Modellierung und Überwachung von hybriden Systemen, jedoch keine Über- wachung des diskreten Zeitverhal- tens	Plattform- unabhängige Visualisierung und Analyse des diskreten und kontinuierlichen Systemverhaltens

Laghmouchi [275]	Geringe Berücksichtigung von Aspekten der Systemarchitektur	Werkzeug- maschinen, Druckluft- systeme	Entwicklung eines adaptiven Entwick- lungswerkzeugs für die Konfiguration von CM-Algorith- men	Geringe Berück- sichtigung von Aspekten der Mensch- Integration
Maier [117]	Definition einer Sys- temarchitektur für Modellidentifikation und Überwachung	Lebensmittel- produktion, Abfüllanlagen	Modellierung und Überwachung von diskreten Systemen	Visualisierung von Anomalien und identifizierten DTA
Mertens [274]	Definition dienst- basierter System- architekturen für die Gestaltung von Monitoring- Anwendungen	Flüssiggas- pumpen	Erstellung eines Metamodells für die automatisierte Kon- figuration von Syste- men der Zustands- und Prozess- überwachung	Rollenspezifische Unterstützung des Menschen bei der Nutzung von Merkmalen
Michl [195]	Definition web- basierter Diagnose- systemarchitekturen	Handhabungs- und Montage- systeme, Elektronik- produktion	Ausschließlich signalbasierte Über- wachung	Wissensmanage- ment auf Basis von Wiki-Systemen
Reidt [266]	Definition einer Referenzarchitektur für ein Instandhal- tungssystem	Karosseriebau	Entwicklung einer Methodik für die vorausschauende Instandhaltung	Unterstützung des Menschen bei der Systemarchitektur- entwicklung
Schleipen [175]	Definition von Systemarchitekuren im Manufacturing Execution System (MES)-Umfeld	Förderanlagen	Überwachung und Steuerung auf MES- Ebene unter Beach- tung von semanti- schen Interoperabili- tätsstandards (OPC UA, AML)	HMI im Bereich MES- Interoperabilität
Vodenčare- vić [115]	Definition einer Systemarchitektur für Modell- identifikation und Überwachung	Lebensmittel- produktion, Abfüllanlagen	Modellierung und Überwachung von hybriden Systemen	Visualisierung von Anomalien und identifizierten SDHA

Tabelle 5: Einordnung, Bewertung und Abgrenzung von Forschungsprojekten im Kontext der Dissertationsschrift

	Forschungsprojekt														
Vergleichskriterium	Intro 4.0 [276, 277]	Metamofab [58]	RetroNet [278–280]	S-CPS [58]	BaSys 4.0 [281]	SecurePLUGandWORK [186, 282, 283]	AGATA [283, 284]	IWEPRO [58]	FEE [285]	CyPros [286, 287]	Ju-RAM14.0 [141]	openAAS [151]	SIDAP [288]	CoMoRes [289]	PRODISYS [290]
7.1				ı		Indu	strie	4.0	ı					ı	
Industrie 4.0	•	•	•	•	•	•	•	•	0	•	•	•	0	0	•
RAMI4.0	0	0	0	•	0	0	0	0	0	0	•	•	0	0	•
Rechtliche Rahmen- bedingun- gen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	•	0	0	0	0
IT- Sicherheit	0	0	0	0	•	•	0	0	0	0	0	•	0	0	0
IoTS- Kommuni- kation	0	0	•	•	•	•	0	•	0	•	•	•	0	0	•
Interopera- bilität	0	0	0	0	•	•	0	0	0	0	0	•	0	0	0
Migrati- onskon- zepte	•	•	•	0	0	•	•	0	•	0	0	•	0	•	0
				So	zio-cy	ber-p	hysis	che Sy	steme	2					
CPS	0	•	•	•	•	0	0	0	0	•	•	•	0	0	0
Mensch- CPS- Interaktion	•	•	0	•	0	0	0	0	0	•	•	0	0	0	0
T . 1		In	stand	haltuı	ng / Zu	ustano	ls- un	d Pro	zessül	berwa	chung	3		l	
Instand- haltung / CMS	0	•	0	•	0	0	•	0	0	0	0	0	•	•	•
Maschinel- les Lernen	0	0	0	0	0	0	•	0	•	0	0	0	•	•	•
	Produktionstyp														
Diskrete Produktion	•	•	•	•	•	•	0	•	0	•	•	•	0	•	•
Kontinu- ierliche Produktion	0	0	0	0	0	0	•	0	•	0	•	•	•	0	0
O Geringe Relevanz				C) Mitt	lere R	elevan	ız			• Ho	he Re	levanz		

Dabei wurde der Erfüllungsgrad eines jeden Kriteriums unter Nutzung einer dreistufigen Skala von geringer bis hoher Relevanz bewertet. Eine Abgrenzung und die Vermittlung eines qualitativen Eindrucks auf Grundlage einer Expertenschätzung ohne Gewichtung der Kriterien steht im Vordergrund. Vor dem Hintergrund der Ergebnisreflexion wird verständlich, dass eine hohe Anzahl aussichtsreicher Lösungsansätze, Methoden und Werkzeuge mit individuellen Voraussetzungen sowie Vor- und Nachteilen existiert. Erkennbar sind Potentiale und Hindernisse von modellbasierter Zustands- und Prozessüberwachung für die Instandhaltung und Betriebsführung mittels Sozio-CPS. Im Kontext der Entwicklung von Smart Factories werden vor allem Aspekte ganzheitlicher Referenzarchitekturen, semantischer Interoperabilität sowie die Abbildung von Self-X-Fähigkeiten substantiell, weshalb in der vorliegenden Forschungsarbeit eine umfängliche Betrachtung dieser Aspekte durchgeführt wird. Bisher ist dem Autor keine Dissertationsschrift bzw. kein Forschungsprojekt bekannt, welches die Aspekte modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung, Sozio-CPS, semantische Interoperabilität, RAMI4.o-Konformität, zusammenführt und umfänglich untersucht.

2.6 Handlungsbedarf

In Anlehnung an den Stand der Technik und Forschung wird in diesem Kapitel der Handlungsbedarf im Kontext der vorliegenden Dissertationsschrift aufgezeigt. Bevor ein Lösungsansatz beschrieben wird, fassen die unten aufgeführten Thesen A bis C die Inhalte aus Kapitel 2 zusammen. Die Thesen spiegeln Erkenntnisse wider, die im Rahmen des begleitenden Forschungsprojekt S-CPS erlangt wurden und eine Grundlage für wissenschaftliche Veröffentlichungen darstellen [P1-P15][20, 22-24, 59].

A. Für die Etablierung von CPS ist die Ausgestaltung von Referenzarchitekturen, Informationsmodellen und Integrationsstrategien notwendig.

Eine wesentliche Herausforderung bei der Realisierung von CPS besteht in der Generierung von Systemen, welche die physische und virtuelle Welt verbinden und dennoch ein vorhersagbares und adaptives Verhalten bei einem hohen Grad an Dynamik aufweisen [12, 17, 110]. Monolithische, historisch gewachsene Systemarchitekturen verhindern jedoch eine flexible Dienstkomposition für das Einbinden von Komponenten und damit das Ausgestalten von CPS [P6, P7][278].

Im Zusammenspiel zwischen Informations-, Automatisierungs- und PLM-Systemen müssen Referenzarchitekturen sowie Strategien für die Integration bestehender Systeme erforscht werden [17, 37, 40, 131, 134, 291, 292].

VS und I4.oK werden als eine Grundbedingung für die Kommunikation im CPPS vorausgesetzt [133, 134, 293]. Handlungsbedarf existiert bei der Einführung und Harmonisierung von Companion Specifications im Bereich OPC UA, wie für die Abbildung von selbstkonfigurierenden Systemen der Zustands- und Prozessüberwachung [P5, P12][160].

B. Für die Umsetzung von resilienten CPPS müssen Systeme der Zustandsund Prozessüberwachung unter Nutzung maschineller Lernverfahren definiert werden.

Vielschichtige CPPS stellen gesteigerte Anforderungen an die Zustandsund Prozessüberwachung sowie die Identifikation von Ursache-Wirkungsbeziehungen im Rahmen der technischen Diagnose [P6-P8][13, 129]. Proprietäre, wenig automatisierte Entwurfsparadigmen, die ein hohes Maß an Expertenwissen bedingen, werden vor dem Hintergrund der erreichten Komplexität ineffizient und tragen zu bestehenden Herausforderungen bei [P5, P6][12, 20, 87, 294]. Das dynamische Verhalten von CPPS impliziert die Forderung nach systemstabilisierenden Steuerungs- und Überwachungsfunktionalitäten, welche Beherrschbarkeit herstellen und die Komplexität dieser Systeme für ihre Benutzer abstrahieren [P6-P8][12, 35, 228].

Im Sinne von Kapitel 2.2, 2.3 und 2.4.3 ist die Rückkopplung von Erkenntnissen aus dem Maschinenbetrieb bzw. der Instandhaltung zur kontinuierlichen Verbesserung nicht in ausreichendem Maß berücksichtigt. Standards wie ISO 13374 und VDMA 24582 bieten hier Lösungsansätze, verwenden Aspekte des maschinellen Lernens zum Ausbau der Diagnosefähigkeiten jedoch nur eingeschränkt. Dies gilt ebenfalls für eine Unterstützung effizienter Publish/Subscribe-Kommunikationsmechanismen. Um den Anforderungen der Zustands- und Prozessüberwachung von CPS hinsichtlich Wandlungs- und Lernfähigkeit gerecht zu werden, genügt es nicht, die in den Standards spezifizierten Funktionalitäten umzusetzen.

Detaillierte Systemdefinitionen im Lösungsraum von RAMI4.0, eine Weiterentwicklung der Systemfähigkeiten durch Erfahrungswissen sowie validierte Vorgehensmodelle sind nicht verfügbar [160, 295, 296]. Folglich sind ganzheitliche Methoden, Architekturen und Standards für die effiziente Modellierung, Implementierung und Verteilung notwendig [P6-P8].

C. Lösungsansätze zur Gestaltung von Sozio-CPS im Anwendungsfall der modellbasierten Zustands- und Prozessüberwachung sind unerforscht.

Bei der Verwirklichung von Sozio-CPS in Produktionssystemen sind ebenfalls Limitierungen aufzulösen. Im Hinblick auf die Thesen A.) und B.) besteht Handlungsbedarf in der Vernetzung von Produktionsressourcen,

CPS, Systemen der Zustands- und Prozessüberwachung und Mitarbeitern [20–22]. Dies betrifft insbesondere Standards zur Integration von Erfahrungswissen des Instandhalters zur Verbesserung von Überwachungs-, Diagnose- und Klassifikationsfähigkeiten [P6-P8].

Vergleichbar mit der Situation bei Systemen der Zustands- und Prozess- überwachung, erfolgt die Entwicklung von HMI unter Nutzung proprietärer, herstellerspezifischer Insellösungen mit jeweils unterschiedlicher Leistungsfähigkeit, Funktionalität, Datenformaten und Softwarearchitektur [P6, P11][37, 297]. Detaillierte Integrationsstandards werden nicht als zentrales Thema berücksichtigt, der Mensch ist nur als Asset Teil von RAMI4.0 [51, 131].

Folglich ist die Erforschung von RAMI4.0-konformen Konzepten für HMI notwendig, welche die Interaktion von einzelnen I4.0K im Gesamtsystem mit den Mitarbeitern erlauben. Zusammenfassend fehlen menschzentrierte Methoden und Werkzeuge, die eine effiziente und intuitive, modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung ermöglichen und dabei durch Weiterverwendung von referenzarchitekturkonformen Daten, Informationen und Wissen aus dem Entwicklungsprozess mit geringem Einrichtungsaufwand einsetz- und konfigurierbar sind.

3 Lösungsweg

Für die Gestaltung von Systemarchitekturen werden in den untersuchten Forschungsarbeiten der vorhergehenden Kapitel vorwiegend proprietäre Lösungsansätze gewählt. Eine durchgängige Verwendung übertragbarer Referenzarchitekturmodelle für die Lösungsgestaltung unter Beachtung von Aspekten einheitlicher Semantik und Interoperabilität sowie maschineller Lernverfahren findet nicht statt. Folglich werden Teilmodelle der I4.0K sowie generische Systeme für die modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis von RAMI4.0 benötigt. Aktuelle Lösungsansätze im Bereich Industrie 4.0 fokussieren auf die Weiterentwicklung technologischer Befähiger und vernachlässigen dabei die Integration des Menschen. Der Mensch als Betriebsführer und Instandhalter, der die Verfügbarkeit vernetzter Produktionsressourcen sichert, ist jedoch ein wichtiger Faktor [P6, P8][20, 22–24, 37]. Die vorliegende Dissertationsschrift erweitert daher die Konzepte von CPS und CPPS um die Interaktion mit dem Menschen zu Sozio-CPS.

Für eine Systemgestaltung lässt die ubiquitäre Verfügbarkeit von informationstechnischen Diensten zukunftsträchtige Perspektiven entstehen. Anwendungslogiken sind auf geeignete Hardwarekomponenten als abstrakte Module verteilbar, aus denen CPPS dynamisch unter Nutzung von Self-X-Fähigkeiten orchestrierbar sind. Die Definition einer Gesamtsystemarchitektur entsprechend RAMI4.0 leistet einen wichtigen Beitrag für die Umsetzung von resilienten Smart Factories. Im nachfolgenden Kapitel erfolgt die Separation notwendiger Funktionalitäten und Anwendungslogiken auf sechs Systeme. Anschließend wird eine Bewertung der entwickelten Artefakte in drei Validierungsszenarien vorgenommen und damit die Anwendbar- und Übertragbarkeit beurteilt. Die Durchführung der Untersuchung basiert wesentlich auf etablierten Kommunikationsstandards und technologischen Befähigern von CPPS, wie dem IoTS-Kommunikationsstandard OPC UA, webbasierten Technologien wie dem bidirektionalen Kommunikationsstandard WebSocket (WS), der Programmiersprache JavaScript (JS) und der Node.js-Plattform [160, 298–300].

Basierend auf der Anforderungsanalyse des Forschungsprojekts S-CPS und des Stands der Technik und Forschung ist eine neunstufige Methode für die Erstellung von Sozio-CPS synthetisierbar. Bild 24 fasst das Vorgehen zur Einführung von Sozio-CPS für die modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung zusammen und ordnet den einzelnen Stufen Systeme zu. Eine referenzarchitekturkonforme Definition dieser Lösungsansätze ist

Gegenstand der nachfolgenden Kapitel. In einer ersten Stufe wird eine Strategie zur Integration von Gegenständen sowie zur Vernetzung einzelner Teilsysteme entwickelt. Für die Anbindung von Gegenständen und Qualifizierung zu I4.oK ist die Entwicklung domänenspezifischer VS notwendig. Wesentlicher Bestandteil sind neben Prozessvariablen und Steuerungsinformationen hybride Automatenmodelle für die Abbildung des Verhaltens zugehöriger Maschinen und Anlagen. Eine werkzeugunterstützte Erstellung von Informationsmodellen, die einer Realisierung von VS dient, ist auf Basis von graphischen Modellierungswerkzeugen effizient möglich [301]. Hierzu gehört die Festlegung eines Basisinformationsmodells (OPC UA Base Information Model), eines FDI-basierten Informationsmodells (FDI Object Model) sowie anwendungsspezifischer Typklassen (Third Party Model) (Stufe 1) [160]. Idealerweise erfolgt die Nutzung von Modellierungsumgebungen für eine effiziente Quelltext- und Typklassengenerierung (Stufe 2) [167, 302, 303]. Nachgelagert findet eine Applikation der VS und damit die Realisierung von I4.0K statt (Stufe 3). Die Verbindung der VS mit den Datenquellen geschieht unter Nutzung von anwendungsfallabhängigen Provider-Konzepten (Stufe 4).

Aufbauend wird die Modeling Engine entworfen, die eine skalierbare Implementierung untersuchter Lernalgorithmen erlaubt und damit die Abbildung von maschinellen Lernverfahren ermöglicht (vgl. Kapitel 2.2) (Stufe 5). Hierbei müssen explizit Aspekte der Emergenz unterstützt werden. Identifizierte Modelle stellen die Datenbasis für dezentrale Monitoring Engines dar, die eine generische Anwendung von Verfahren der Zustands- und Prozessüberwachung sowie reflektorische Daten-, Informations- und Wissensverarbeitung zulassen (Stufe 6). Zu den Funktionen gehört die Durchführung fortlaufender Zustandsvergleiche, die Weitergabe von Anomalien sowie das Erstellen von Diagnosen und Instandhaltungszeitpunkten. Ergänzend wird eine Methode zur dreidimensionalen Visualisierung basierend auf den Vorzugsstandards von RAMI4.o konzipiert (3D-CPS) (Stufe 7).

Die Rückführung menschlichen Wissens zur Verbesserung des Instandhaltungsprozesses in Anlehnung an Kapitel 2.3 erweitert das Sozio-CPS (Stufe 8). Funktionen eines integrierten Wissensmanagements und Methoden zur Fusion von Anomalien, Diagnosen, Steuerungsinformationen, Prozessvariablen, System- und Prozessmodellen, Handlungsanweisungen und Fehlerbeschreibungen werden auf der Grundlage des Diagnosesystems für CPS (D-CPS) berücksichtigt. Schließlich werden Aspekte der Selbstoptimierung ebenfalls in einem separaten Teilsystem abgebildet (Optimization Engine).

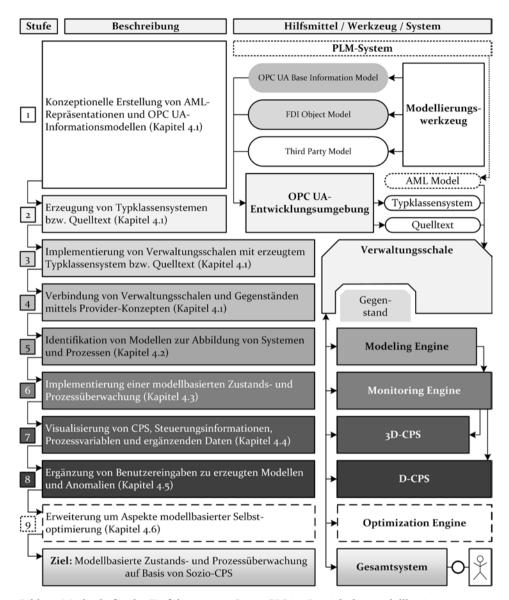


Bild 24: Methode für die Einführung von Sozio-CPS im Bereich der modellbasierten Zustands- und Prozessüberwachung

4 Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme

Die technische Komplexität von Smart Factories wird durch den Einsatz von Self-X-Fähigkeiten, Referenzarchitekturmodellen und semantischen Interoperabilitätsstandards beherrschbar. Bild 25 führt ein skalierbares Gesamtsystem ein, das menschlichen Bedienern eine Interaktion mit Sozio-CPS über nutzergerechte Schnittstellen erlaubt.

In Anlehnung an Kapitel 2 und die Ergebnisse des Forschungsprojekts S-CPS erweitern Sozio-CPS das Konzept der CPS von *Broy* und *Geisberger* sowie *Gausemeier et al.* (vgl. Tabelle 6). Anschließend wird eine Beschreibung der Verteilung der Funktionalitäten auf einzelne Systeme vorgenommen. In den nachfolgenden Kapiteln erfolgt eine detaillierte Beschreibung der Systemarchitekturen. Im Vergleich zu den verfügbaren Lösungsansätzen im Stand der Technik und Forschung werden Self-X-Fähigkeiten, maschinelles Lernen und Emergenz von CPS, semantische Interoperabilitätsstandards, SOA, Web-Technologien sowie Aspekte modellbasierter Zustands- und Prozessüberwachung, des Wissensmanagements und der Selbstoptimierung in einer konsistenten Gesamtsystemarchitektur berücksichtigt und damit die in Kapitel 2.6 aufgezeigten Limitierungen aufgelöst.

Ausgewählte Aspekte der Gesamtsystemarchitektur sind bereits veröffentlicht [P2-P9, P11, P12, P14, P15]. Weiterhin ist eine Validierung ausgewählter Aspekte im Rahmen von dissertationsbezogenen, studentischen Arbeiten erfolgt [S2, S3, S6, S10-S12, S15, S22, S24-26, 28, S29, S30].

4.1 Verwaltungsschalen für die Zustands- und Prozessüberwachung

Für die Implementierung eines Sozio-CPS werden bestehende Informations-, Automatisierungs- und PLM-Systeme sowie Diagnoseinfrastrukturen integriert und Qualifikationskonzepte ermittelt [P12][21]. Hierfür wird eine Modellierung von Produktionsprozessen, -anlagen und -komponenten sowie von informationstechnischen Diensten mittels VS vorgenommen. Tabelle 7 fasst die im vorliegenden Anwendungsfall relevanten Inhalte einer VS in Anlehnung an das Projekt S-CPS zusammen und stellt den Bezug zu Lösungsansätzen des RAMI4.0 her (vgl. Kapitel 2.1). Wesentliche

4 Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme

Inhalte sind als Teilmodell in der VS mit den existierenden Technologien OPC UA und AML abbildbar. Gemäß Kapitel 2.1.4 werden geeignete OPC UA Companion Specifications um anwendungsspezifische Typklassen erweitert. Neuheitscharakter hat der Einsatz von Sprachen der Graphmodellierung (Graph Modeling Language – GraphML), die identifizierte SDHA in einem Teilmodell einer VS abbilden können [304]. Inhalte einer VS divergieren mit den Anforderungen, eine vollkommene Standardisierung ist nicht vorgesehen.

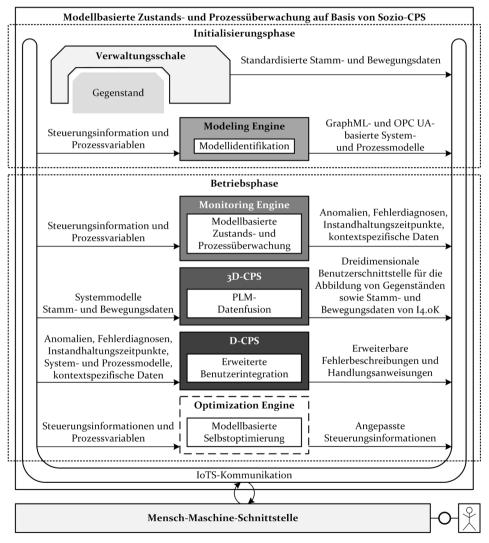


Bild 25: Architektur eines Sozio-CPS für die modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung sowie Ein- und Ausgangsdaten der definierten Systeme

Tabelle 6: Erweiterung des Konzepts von CPS zu Sozio-CPS im Kontext modellbasierter Zustands- und Prozessüberwachung

Sozio-CPS-Aspekt	Beschreibung	System
Ergonomische, rollen- spezifische HMI	Einsatz von Benutzerrollenmodellen und mobilen Endgeräten zur effektiven Interaktion von Mensch und CPS [59, 305]	Gesamt- system
Erweiterte Mensch- Maschine- Interaktion	Weiterentwicklung von Funktionalitäten der Datenvisualisierung hin zu erweiterter Mensch-Maschine-Interaktion sowie Nutzung von Benutzereingaben und -klassifikationen zur Ergänzung von Zielwerten für maschinelle Lernprozesse	Modeling Engine
Effiziente Generierung von Mensch-Maschine- Schnittstellen	Durchgängige Weiterverwendung von PLM-Daten zur automatisierten Generierung von HMI unter Nutzung der RAMI4.o-Vorzugsstandards	₃ D-CPS
Transparente Selbst- optimierungsvor- gänge	Schaffung von Transparenz bei der Applikation von Vorgängen der Selbstoptimierung	Optimiza- tion Engine
Domänenspezifische Erweiterungen	Erweiterung um menschzentrierte, signal- und modellgestützte Zustands- und Prozessüberwachung sowie vorausschauende Instandhaltung	Gesamt- system
Plattform- und Hersteller- unabhängigkeit	Einsatz von webbasierten, plattformunabhängigen Technologien zur Entwicklung kontextsensitiver HMI	Gesamt- system
Dynamische Modell- bildung emergenter Systeme	Bildung komplexitätsreduzierter Modelle von Systemen und Prozessen	Modeling Engine
Steuerungskonzepte	Steuerung von Self-X-Fähigkeiten durch den Menschen (Modellgenerierung und -übertragung)	Gesamt- system
Konfiguration von Self-X-Fähigkeiten	Auswahl von Prozessvariablen und Steuerungs- informationen für Lernalgorithmen und Optimie- rungsfunktionalitäten im Spannungsfeld zwischen Selbstkonfiguration und manueller Konfiguration	Gesamt- system
Wissens- management	Ergänzung von Benutzerwissen und -eingaben als Metadaten an identifizierte System- und Prozessmodelle	D-CPS

4 Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme

Tabelle 7: Inhalte einer Verwaltungsschale zum Zweck der Zustands- und Prozessüberwachung, eigene Aufstellung in Anlehnung an [P5, P12][20]

Aspekt der VS	Lösungsansätze / Technologien			
Allgemeine Informationsmodellierung	OPC UA-basiertes FDI-Informationsmodell sowie anwendungsfallspezifische Typklassen			
Datenbanken / Logdateien	Integration von Datenbanken und Logdateien durch die Implementierung von OPC UA HA bzw. Parserbibliotheken			
PLM-Daten	AML-Standards (CAEX, COLLADA, PLCopen XML)			
Systemmodelle	OPC UA-Typklassensystem bzw. GraphML			
IT-Sicherheit	Verschlüsselungs- und Sicherheitsmechanismen			
Benutzerrollen	OPC UA-basierte Benutzerverwaltung			

Bild 26 veranschaulicht den Integrationsaufwand verschiedener Arten von Daten und Gegenständen vor dem Hintergrund des VS-Konzepts. IoTS-Kommunikationsstandards, die idealerweise über eine einheitliche Semantik verfügen, sind verhältnismäßig einfach über entsprechende Kommunikationsimplementierungen in der VS zu berücksichtigen.

Industrielle Kommunikationsprotokolle, wie etwa ModbusTCP, bieten ebenfalls effiziente Möglichkeiten der Kommunikation, verfügen jedoch über keine hinreichende semantische Darstellung [P2, P3]. Die Integration von Dateien und historischen Daten, wie im Fall von Logdateien oder Datenbanken, setzt entsprechende Parserimplementierungen voraus. Vergleichsweise aufwändig sind komponenteninterne Daten, da hier in der industriellen Praxis eine Modifikation der Steuerungsprojektierung mittels Projektierungswerkzeugen bzw. Middleware-Lösungsansätzen notwendig ist. Grundsätzlich wird Aufwandsminimierung angestrebt. Falls benötigte Informationen über IoTS-Kommunikationsstandards bereitgestellt werden, ist die Integration aufwändigerer Datenquellen nicht notwendig. Eine Implementierung von VS geht daher mit der Notwendigkeit diverser Provider-Konzepte einher [160]. Enthalten sind weiterhin Teilmodelle für GraphML-Repräsentationen, AML- und OPC UA-basierte Inhalte [P12].

Neben den anwendungsspezifischen Informationsmodellen wird für die Realisierung einer Selbstkonfiguration von modellbasierten Systemen der Zustands- und Prozessüberwachung eine Darstellung von SDHA in den zugehörigen VS umgesetzt. Eine Ausgangsgrundlage bietet das Basistypklassensystem von OPC UA und die definierten Typklassen von Kohl [160, 264]. Prozessvariablen (*ProcessVariable*) und kontinuierliche Modelle (*ContinuousBehaviour*) sowie zugehörige Warn- und Eingriffsgrenzen sind

gemäß Bild 27 modellierbar. Die weitere Abbildung eines SDHA erfolgt auf der Basis einer GraphML-Repräsentation sowie eines OPC UA-Typklassensystems (vgl. Kapitel 2.1). Bild 28 zeigt ein Typklassensystem, das die hybriden Zustände (*HybridState*), stochastische, zeitbehaftete Transitionen (*StochasticTimedTransition*, *MinTime*, *MaxTime*, *Probability*), den aktuellen und historischen Zustand (*CurrentState*, *LastTransition*) sowie entsprechende Warn- und Eingriffsgrenzen der Prozessvariablen (*UpperWarningLimit*, *LowerWarningLimit*, *UpperControlLimit*, *LowerControlLimit*) berücksichtigt. In Anlehnung an das eingeführte Stufenkonzept dienen VS als Anknüpfungspunkt für Modeling Engines und Monitoring Engines sowie weitere Teilnehmer im IoTS.

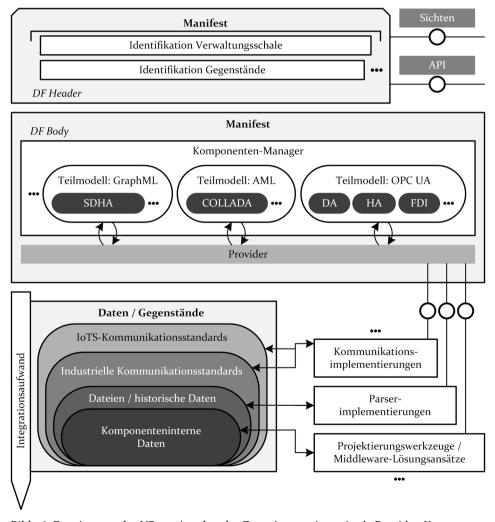


Bild 26: Erweiterung der VS um Aspekte der Datenintegration mittels Provider-Konzepten

4 Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme

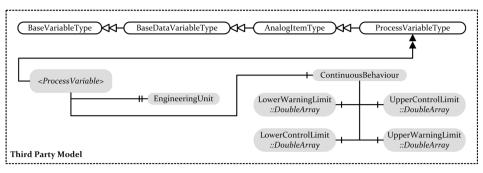


Bild 27: OPC UA-Informationsmodell für die Abbildung von Prozessvariablen sowie deren Warn- und Eingriffsgrenzen

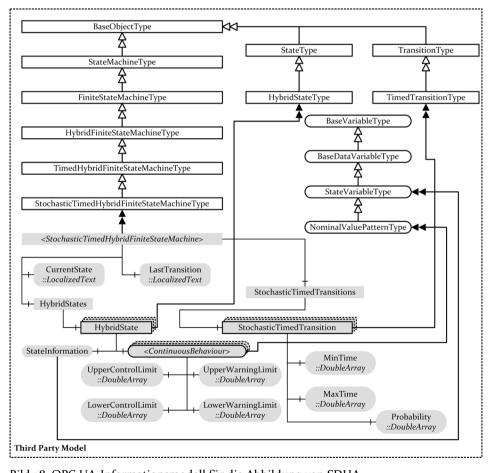


Bild 28: OPC UA-Informationsmodell für die Abbildung von SDHA

4.2 Identifikation von Systemmodellen

Zur Auflösung der Limitierungen des Stands der Technik und Forschung aus Kapitel 2 wird in diesem Abschnitt ein System zur Identifikation von Modellen emergenter CPS eingeführt (Modeling Engine). Der Fokus liegt auf dem Entwurf einer standardisierten Architektur für die Applikation von Lernalgorithmen. Eine Konfiguration und Bedienung sowie die Identifikation von Modellen einer Zustands- und Prozessüberwachung soll nur ein minimales Maß an Expertenwissen voraussetzen.

Bei der Systemgestaltung werden sowohl die Rolle des Anlagenherstellers als Domänenexperten sowie die Rolle des Produktionssystembetreibers adressiert, die jeweils ein unterschiedliches Maß an Wissen über beteiligte Systeme und Prozesse besitzen. Während die horizontale und vertikale Integration unter Nutzung von IoTS- Kommunikationsstandards bereits im Stand der Technik und Forschung umfassend definiert ist, wird nun insbesondere dem Rücktransfer verbesserter Anwendungslogik bzw. identifizierter Systemmodelle auf Basis einheitlicher Systemarchitekturen Aufmerksamkeit gewidmet (vgl. Kapitel 2.1.2).

Dabei fügt sich die Modeling Engine effizient in verteilte, veränderliche Strukturen und Topologien von CPS ein. Das Konzept zur Zustandsüberwachung und Fehlererkennung wurde im Rahmen der funktionalen Module des Projekts S-CPS entwickelt und ist bereits veröffentlicht [P6-P9, P14, P15][S2, S4, S7, S15, S28][24, 37, 266, 268, 306].

4.2.1 Lösungsansatz

Im vorliegenden Fall fungiert die Modeling Engine als Dienst für die Bereitstellung identifizierter Modelle und die Verwaltung von Trainingsdaten, während eine Monitoring Engine die reflektorische Verarbeitung von Informationen dezentral vornimmt. Zudem soll der Benutzer bei dem Einsatz von maschinellen Lernverfahren unterstützt werden. Bild 29 verdeutlicht das Prinzip eines Lerners, der aus Trainingsdaten von VS bzw. Ein- und Ausgabemustern Merkmalsvektoren erstellt und ein Black Box-Modell identifiziert.

4.2.2 Architekturkonzept

Das architektonisch mehrteilige Konzept für maschinelles Lernen im Bereich der Zustands- und Prozessüberwachung, welches mit der Entwicklung von Modeling Engine und Monitoring Engine angestrebt wird, unterscheidet sich grundlegend von existierenden Lösungsansätzen. Während *Binner* eine statische, dezentrale Verteilung der Funktionalitäten des

maschinellen Lernens innerhalb einzelner Instanzen vorsieht, konzentrieren *Niggemann et al.* Lern- wie auch Überwachungsprozesse vollständig auf einen zentralen Dienst [57, 191]. Eine Realisierung unabhängiger Teilsysteme für die Identifikation und Aktualisierung von Modellen bzw. für die konkrete Überwachung von Systemen und Prozessen eröffnet folgende Vorteile [P6-P9, P14, P15][S2, S4, S7, S15, S28][24, 37, 266, 268, 306]:

- Abkehr von monolithischen Systemen der AP hin zu lose gekoppelten SOA, in der Dienste im Produktionssystem synthetisier-, austausch- und orchestrierbar sind (vgl. Kapitel 2.1.2).
- Kapselung der Anwendungslogik von Monitoring Engine und Modeling Engine unter Verwendung von Virtualisierungstechnologien, um eine plattformunabhängige Ausführbarkeit zu erreichen.
- Konzentration der sporadisch benötigten Ressourcen für maschinelle Lernprozesse zugunsten der Skalierbarkeit.
- Entlastung der echtzeitfähigen Feldbussysteme auf Maschinenebene durch die Begrenzung des Datenaufkommens, da nur ausgewählte Informationen wie detektierte Anomalien und Diagnosen bedarfsorientiert bzw. ereignisgesteuert an dezentrale Monitoring Engines kommuniziert werden.
- Erhöhung der Effizienz des Gesamtsystems durch Übertragung von identifizierten Modellen in eine Vielzahl von Monitoring Engines. Die sporadische Modellidentifikation und die kontinuierliche Zustands- und Prozessüberwachung sind somit in zwei unabhängige Teilsysteme separiert.
- Erzielung einer höheren Resilienz gegenüber dem Ausfall zentraler Systeme.
- Trennung von Verantwortlichkeiten: Jede Komponente erfüllt einen dedizierten Zweck und ist ohne Modifikationen am Gesamtsystem implementier- bzw. modifizierbar.
- Verteilung der performanten, reflektorischen und deterministischen Informationsverarbeitung auf dezentrale Monitoring Engines, neben der Umsetzung der komplexen Funktionalitäten zur Modellgenerierung durch eine zentralisierte Modeling Engine.

Bild 108 fasst die wesentlichen Funktionalitäten und Nutzergruppen der Modeling Engine in einem Anwendungsfalldiagramm zusammen. Neben der Parametrierung, Steuerung und Überwachung von maschinellen Lernprozessen für die Modellidentifikation steht die Auswahl überwachungsrelevanter Steuerungsinformationen, Prozessvariablen und Lernalgorithmen sowie die Ergänzung von Zielwerten für überwachte Lernverfahren durch

den Menschen im Vordergrund. Ergänzende Funktionen beinhalten die Verwaltung von Modell- und Trainingsdaten und das Setzen von Grenzwerten für die Überwachung des Produktionsprozesses sowie der Produktqualität. Die identifizierten Modelle werden von Monitoring Engine, I4.0K und D-CPS eingesetzt. Initial wird ein Systementwurf auf Grundlage von RAMI4.0 durchgeführt. Fokussiert wird anschließend eine Entwicklungssicht, die eine übertragbare Darstellung der Funktionsweise einzelner Komponenten des Teilsystems bietet.

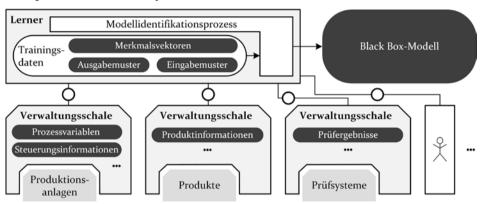


Bild 29: Prinzip des überwachten Lernens zur Modellgenerierung im Kontext der I4.0K, eigene Erweiterung in Anlehnung an [147]

4.2.3 Referenzarchitektursicht

Unter Beachtung der Eigenschaften von Lernalgorithmen in Kapitel 2.2.2 wird die Gestaltung der Modeling Engine in Anlehnung an den Lösungsraum von RAMI4.0 vorgenommen. Hierbei werden für Im- und Export von relevanten Daten und Informationen aus dem Produktionssystem die Kommunikationsstandards OPC UA, Hyper Text Transfer Protocol (HTTP) und WS im Communication Layer genutzt. Neben der Unterstützung OPC UA- und GraphML-basierter Informationsmodelle für die Abbildung von SDHA, sind anwendungsinterne Informationsmodelle und Trainingsdaten im Information Layer zu berücksichtigen. Im Functional Layer erfolgt die Definition von Lernalgorithmen sowie von Funktionalitäten zur Dienstkomposition, Identifikation, Verwaltung und Visualisierung von Modellen. Auf Ebene des Business Layer wird zusammenfassend ein System zur Modellidentifikation implementiert. Als Softwaresystem befinden sich die Funktionalitäten hinsichtlich der Dimension Hierarchy im Bereich Enterprise und Connected World. Bild 30 visualisiert den Entwurf auf Basis von RAMI4.o. Im nächsten Kapitel wird aufbauend eine Entwicklungssicht eingeführt, die den internen Aufbau und die Funktionalität beschreibt.

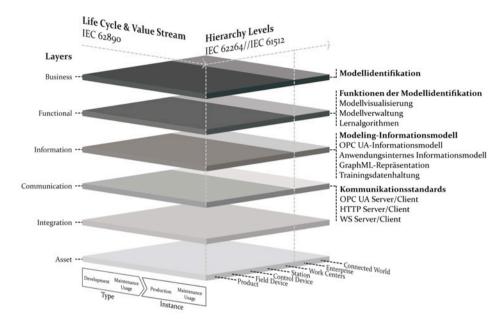


Bild 30: Modell der Modeling Engine auf Basis von RAMI4.0, eigene Definition in Anlehnung an [133]

4.2.4 Entwicklungssicht

Primär hat die Modeling Engine die Aufgabe, Modelle von Produktionsprozessen und Systemen zu identifizieren. Eine datenflussorientierte Analyse unterstützt die effiziente Realisierung verteilter Anwendungen [306]. Bild 31 fasst die Entwicklungssicht zusammen, bevor die einzelnen Komponenten erläutert werden.

Konkret bedarf es einer Verbindungslogik, um die Teilsysteme I4.oK, Modeling Engine und Monitoring Engine zusammenzuführen. Während die Übertragung der statischen Inhalte der Browseranwendung (HTML/JS/Graphiken...) per HTTP stattfindet, geschieht die fortlaufende Übertragung von Prozessvariablen und Steuerungsinformationen der I4.oK für die browserbasierte Visualisierung effizient unter dem Einsatz von WS. Außerdem werden Anwender befähigt, den Identifikationsprozess mittels einer browserbasierten *Orchestrationsplattform* zu verwalten. In diesem Fall unterstützt die datenflussorientierte Entwicklungsumgebung Node-RED die wandlungsfähige Implementierung der *Orchestrationsplattform* für eine Verknüpfung von I4.oK, Modeling Engine und dem Bediener [307]. Die Integration der Modeling Engine als Anwendung wird in diesem Fall durch eine Kombination aus dem Transmission Control Protocol/Internet

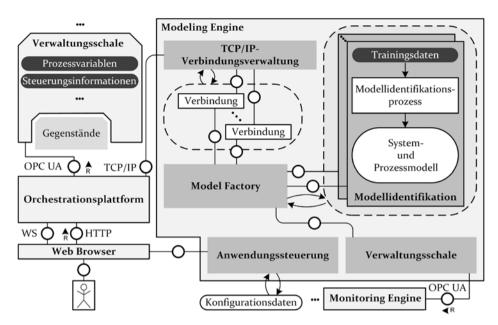


Bild 31: Entwicklungssicht der Modeling Engine (angelehnt an [P6, P8][S28])

Protocol (TCP/IP), bidirektionalen TCP/IP-Socketverbindungen, der Java-Script Object Notation (JSON) sowie der *TCP/IP-Verbindungsverwaltung* erreicht. Der Anspruch, Verbindungen gleichzeitig zu verwalten wird mit dem Factory-Entwurfsmuster gelöst [P6, P8][S28]. Ein über die Laufzeit erzeugtes Factory-Objekt verwaltet eine dynamische Struktur von Protokollobjekten, welche jeweils eine Verbindung repräsentieren.

Analog zur Anforderung, dass mehrere Verbindungen zur gleichen Zeit unterstützt werden müssen, soll auch das parallele Identifizieren von System- und Prozessmodellen sein. Eine Model Factory instanziiert hier im Rahmen einer Strukturvarianz verschiedene Methoden für die Modellidentifikation und stellt durch eine Reihe von Befehlen eine Schnittstelle für die Handhabung unterschiedlich ausgeprägter Modelle bereit. In diesem Prozess wird unter Nutzung von Trainingsdaten, wie Prozessvariablen, Steuerungsinformationen, Nutzereingaben und Qualitätsdaten ein Modell der vorliegenden CPS (Gegenstände) nach dem Konzept des maschinellen Lernens erzeugt. Hohe Flexibilität bei der Wahl des Modells sowie Erweiterbarkeit werden durch eine objektorientierte Abbildung von Abhängigkeiten zwischen Modelltypen in einer Klassenstruktur erreicht. GraphML eignet sich als Grundlage für die Darstellung unterschiedlicher Arten von Zustandsautomaten. Im vorliegenden Fall bieten Frameworks, wie beispielsweise NetworkX, ein modifizierbares Graphenmodell sowie Möglichkeiten zur Datenanalyse [308].

Bild 32 zeigt exemplarisch die implementierte Variante des OTALA-Algorithmus, der um zeitbehaftete, probabilistische Transitionen, Prozessvariablen und eine GraphML-basierte Repräsentation zur Abbildung von SDHA erweitert wurde. Das Modell kann nach Abschluss des Lernvorgangs über eine *Verwaltungsschale* für die Nutzung in Monitoring Engines exportiert werden. Neben den unter Kapitel 2.1.2 eingeführten Automatenmodellen sind Hidden Markov Modelle für die Abbildung von CPS im Fall nichtverfügbarer Steuerungsinformationen potentiell geeignet [309]. Die Steuerung des Modellidentifikationsprozess erfolgt gemäß Tabelle 8.

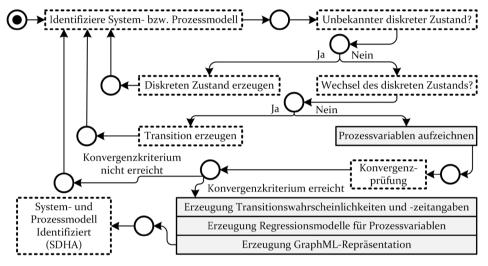


Bild 32: Erweiterung des OTALA-Algorithmus zur Identifikation von SDHA (angelehnt an [117])

Tabelle 8: Aktionen zur Steuerung des Modellidentifikationsprozesses

Aktion	Parameter	Beschreibung / Ausgabe
Initialisieren	<name>, <type></type></name>	Erzeugung eines Modells des Typs <type> mit der Bezeichnung <name>.</name></type>
Zurücksetzen	<name></name>	Rücksetzung eines Modells auf dessen Ausgangszustand.
Löschen	<name></name>	Löschung eines bestimmten Modells.
Informieren	<name></name>	Rückgabe von Informationen zum übergebenen Modell.
Lernen	<name>, <data></data></name>	Start des Lernalgorithmus in Kombination mit einem Modell <name> für einen observierten Datenpunkt <data>.</data></name>
Finalisieren	<name></name>	Start der Nachverarbeitung eines Modells <name>.</name>
Exportieren	<name></name>	Export eines Modells <name> im Datenformat GraphML.</name>

4.3 Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung

Im Folgenden wird unter Berücksichtigung der Modularisierung nach Isermann und ISO 13374 ein für Sozio-CPS geeigneter Lösungsansatz für die modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung und darauf aufsetzende Funktionen eingeführt [47–50, 193, 198] (vgl. Bild 33 bzw. Kapitel 2.2). Analog zur Identifikation von Systemmodellen wurden wesentliche Grundlagen im Projekt S-CPS entwickelt und fließen in die Gestaltung eines Ressourcen-Cockpits ein [P8][266, 267]. Ziel der in ISO 13374 vorgestellten Aufteilung ist die Modularisierung und die Adaptierbarkeit von Systemkomponenten. Isermann grenzt hingegen Funktionalitäten ab und hat nicht das Ziel, einen Systementwurf zu entwickeln. Grundsätzlich stellt ein Prozess sowohl die Daten- und Informationsquelle als auch das zu überwachende Objekt dar (vgl. Kapitel 2.2). Im Anschluss werden Prozessvariablen und Steuerungsinformationen erfasst, bevor eine Datenverarbeitung erfolgt. Spezifische CM-Algorithmen werden eingesetzt, die Isermann signal- und modellbasierter Überwachung zuteilt. Im Anschluss finden eine erweiterte Analyse des Prozesses und eine Fehlerdiagnose statt. Abschließend wird die Bereitstellung von Prognosen und Handlungsanweisungen betrachtet. Eine sukzessive Steigerung des Informations- und Wissensgehaltes geschieht durch Analyse der verfügbaren Informationen, dem Vergleich mit Referenzdaten sowie der Integration von a priori-Wissen.

Bild 34 fasst die Funktionsweise der Prozessüberwachung zusammen. U sowie $Y + \Delta Y$ werden hier im Rahmen der *Datenerfassung* für nachgelagerte Funktionalitäten bereitgestellt [49]. Analog zur Zustandserfassung erlauben semantische Interoperabilitätsstandards gemäß Kapitel 2.1.4 eine kontextbezogene Annotation um Metadaten [131, 160]. Eine anschließende Datenvorverarbeitung nutzt Methoden aus der Signalverarbeitung, wie die Applikation von Filterfunktionen zur Minimierung von Störgrößen und der Extraktion von Merkmalen aus Informationen I, die für eine Bestimmung des Prozesszustands relevant sind. Die Ausgabe der Komponenten stellen Schätzungen von Prozesszuständen \hat{X} , Schätzungen von Prozessparametern θ und Residuen R von Modell und Prozess dar [49, 193, 198, 201]. Auf dieser Basis entscheidet die Analyse über den Zustand eines Prozesses. Hierzu gehören Funktionalitäten der Zustandsbewertung sowie die Erkennung fehlerhaften Verhaltens. Isermann entwickelt zur Strukturierung von Analysemethoden ein Klassifikationsschema [198, 310]. Das Ergebnis stellen Symptome S dar, die aus verschiedenen Merkmalen, wie Art, Zeitpunkt, Frequenz oder Dauer einer Anomalie bestehen und als Eingangsdaten für die Fehlerdiagnose dienen [193]. Die Fehlerdiagnose thematisiert die

Bewertung von Symptomen und die Bereitstellung von Fehlerbeschreibungen f für den menschlichen Bediener [193, 195]. Zur Implementierung wird anwendungsspezifisches a priori-Wissen vorausgesetzt, da potentielle Einflussgrößen und Fehlerquellen identifiziert und verknüpft werden müssen. Hierfür sind Lösungsansätze im Stand der Technik und Forschung verfügbar (vgl. Kapitel 2.2). Abschließend werden *Prognosen* bzw. *Handlungsanweisungen* H bereitgestellt.

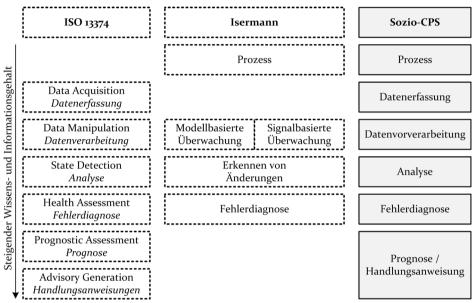


Bild 33: Methode für die Zustands- und Prozessüberwachung mit Sozio-CPS, eigene Erweiterung in Anlehnung an [47–50, 193]

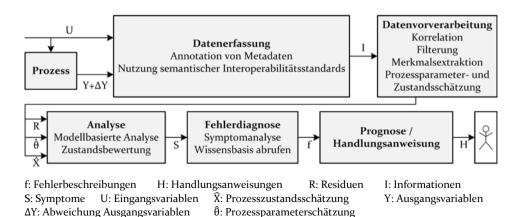


Bild 34: Lösungsansatz für die Zustands- und Prozessüberwachung mit Sozio-CPS, eigene Definition in Anlehnung an [47–50, 193]

4.3.1 Lösungsansatz

Neben den Modellen, die das Normalverhalten einer Anlage repräsentieren sind Funktionalitäten notwendig, die eine Zustands- und Prozessüberwachung zur Laufzeit eines Systems erlauben. In diesem Zusammenhang dient der *Anomaly Detection Algorithm* (ANODA) zur Erkennung von unbekannten Abfolgen diskreter Zustandsänderungen, nicht spezifizierten Ereigniszeitpunkten für Transitionen und ungültigen Werten von Prozessvariablen auf Basis von hybriden Automatenmodellen [311]. Neben ANODA werden für die Überprüfung der kontinuierlichen Prozessvariablen weitere Methoden eingeführt.

Für die Erkennung von Fehlern und Anomalien ist eine Definition, Abgrenzung und Klassifizierung notwendig. Im vorliegenden Fall werden die Definition nach *Isermann* für die Begriffe Fehler, Anomalie, Ausfall, Fehlfunktion und Fehlererkennung genutzt [54, 193]. Dies gilt ebenfalls für die Differenzierung von Fehlern und Anomalien in Abhängigkeit von Form, Zeitverhalten, Ausprägung, Einfluss und Mechanismus [54, 198]. Einen wichtigen Schritt der Datenvorverarbeitung stellt die Signalverarbeitung dar. Sie wird sowohl zum Entfernen ungewollter Artefakte, bedingt durch Störeinflüsse im Rahmen der Datenakquise, als auch zur Berechnung abgeleiteter Prozessgrößen angewendet [193]. In Tabelle 9 sind ausgewählte Methoden, sowie deren Ziel und Anwendung aufgelistet. Im Kontext dieser Dissertationsschrift sind etablierte Verfahren, wie die Fourier-Transformation von Relevanz [194]. Aufbauend werden Funktionen zur Hüllkurvengenerierung und vorausschauenden Instandhaltung eingeführt.

Tabelle 9: Methoden zur Signalverarbeitung im Konzept der Monitoring Engine (angelehnt an [49, 193, 220])

Methode	Ziel	Anwendung
Statische Grenzwertüberprüfung	Anomalieerkennung	Signalbasierte Zustands- überwachung (vgl. Kapitel 2.2)
Dynamische Grenzwertüberprüfung	Anomalieerkennung	Modellbasierte Zustands- überwachung (vgl. Kapitel 2.2)
Minima-/Maxima- Analyse	Detektion von lokalen Minima und Maxima	Produktionsprozessüberwachung [P9][312, 313]
Dynamic Time Warping	Ausrichtung von Zeitreihen	Ausgleich zeitlicher Varianzen [314]
Integration	Akkumulieren und Integrieren	Analyse von Energiedaten [P6]
Fourier- Transformation	Zerlegung eines Signals in Frequenzanteile	Schwingungsanalyse [194]

Die Minima/Maxima-Analyse identifiziert lokale Minima und Maxima in Zeitreihen in Anlehnung an die Algorithmen von *Billauer* und *Tournade* [312, 313]. Die dynamische Grenzwertprüfung und das Dynamic Time Warping (DTW) - Verfahren werden nachfolgend detailliert dargelegt.

Dynamische Grenzwertüberprüfung

Veränderungen in den Prozessvariablen sind ein Hinweis auf sich abzeichnende kritische Zustände innerhalb von Produktionsprozessen (vgl. Kapitel 2.2). Für die Zustands- und Prozessüberwachung werden daher Warn- und Eingriffsgrenzen unter Berücksichtigung inhärenter Wertschwankungen eingesetzt.

In diesem Fall wird eine Funktionalität entwickelt, die Hüllkurven für Prozessvariablen automatisiert erstellt. Zunächst werden Hüllkurven auf der Grundlage fehlerfreier Datensätze generiert. Der Verlauf einer Prozessvariable des Merkmals befindet sich innerhalb eines prozessbedingten Toleranzbereichs. Um Wertschwankungen bedingt durch Rauschen und Signalstörungen zu kompensieren, werden die Hüllkurven in Abhängigkeit der Anwendung in Abszisse bzw. auch in der Ordinate erweitert (X-Hüllkurve bzw. XY-Hüllkurve). Zeitreihen, die eine erweiterte Hüllkurve überschreiten, werden als Anomalie klassifiziert. Bild 35 verdeutlicht die Methode am Beispiel der modellbasierten Zustands- und Prozessüberwachung von Heißcrimpanlagen (vgl. Kapitel 5.3) [P9, P11].

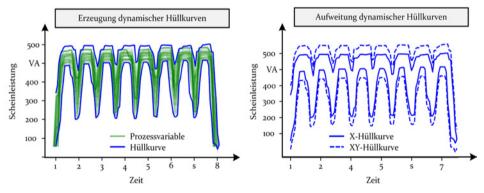


Bild 35: Erzeugung von Hüllkurven für die modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung von Heißcrimpanlagen (angelehnt an [P9, P11][220])

Dynamic Time Warping

Prozessvariablen sind aufgrund von Veränderungen in Produkt, Prozess und Ressource nicht deterministischen, zeitlichen Schwankungen unterworfen. Beispiele sind veränderliche Bauteilpositionen und variierende

Werkzeug-, Werkstoff- und Maschineneigenschaften im Produktionsprozess. Diese wirken sich nicht negativ auf die Prozess- und Produktqualität aus, müssen jedoch zur Verhinderung von Fehldetektionen korrigiert werden. In diesem Zusammenhang dient der Algorithmus DTW zur Überprüfung zeitlicher Abweichungen von Prozessvariablen. DTW wird in verschiedenen Domänen, wie der Muster- und Spracherkennung, eingesetzt. Der nachfolgend beschriebene Lösungsansatz basiert auf den Ausführungen von Vasquez-Correa et al., Cassisi et al. und M"uller [S25, S28, S29][314–316]. Für die Detektion der Korrelation wird eine Kostenmatrix $C \in \mathbb{R}^{N \times M}$ mit $(N, M \in \mathbb{N})$ basierend auf der euklidischen Distanz der jeweiligen Wertepaare einer Zeitreihe erstellt. Die Kosten stellen dabei ein Maß für den Unterschied zugehöriger Datenpunktpaare der Zeitreihen dar. Um einen optimalen Korrelationspfad zu identifizieren, werden die akkumlierten Kosten $A \in \mathbb{R}^{N \times M}$ auf Basis der Gleichung (1) errechnet.

$$A_{m,n} = C_{m,n} + \min (A_{m-1,n}, A_{m,n-1}, A_{m-1,n-1}), n = 1, ..., N; m = 1, ..., M$$
 (1)

Ein optimaler Pfad P^* wird in rückwärtiger Reihenfolge durch Suchen der kleinsten akkumulierten Kosten festgelegt, wobei *argmin* die Indizes ausgiebt (vgl. Gleichung (2)).

$$P^* = (P_1, ..., P_L) \text{ mit } P_L = (N, M) \text{ und } P_{l-1} = argmin(A_{m-1,n}, A_{m,n-1}, A_{m-1,n-1})$$

mit $(n, m) = P_{l}, l = 1, ..., L$ (2)

Die korrekte Zuordnung von Laufzeit- und Modelldaten wird außerdem durch differenzierende Zeitstempel mittels des RAMI4.o-Vorzugsstandards OPC UA unterstützt (vgl. Kapitel 2.1.4).

Vorausschauende Instandhaltung

Lösungsansätze für die Implementierung vorausschauender Instandhaltung sind im Stand der Technik und Forschung verfügbar (vgl. Kapitel 2.2.2). Ergänzend kann ein Konzept zur Umsetzung im Kontext einer modellbasierten Zustands- und Prozessüberwachung entwickelt werden.

Etablierte Methoden der regressionsbasierten, vorausschauenden Instandhaltung werden mit einer iterationsbasierten, teilprozessbezogenen Auswertung für eine Berücksichtigung der Produktion in Losgröße 1 kombiniert. Bild 36 verdeutlicht die Methodik in Anlehnung an die RFID-Technologie [51]. Im Falle sich abzeichnender Trends einzelner Wertverläufe in Richtung einer Hüllkurve, kann die Anzahl an Iterationen bis zur Überschreitung einer Hüllkurve approximiert werden. Detaillierte Ergebnisse wurden bereits veröffentlicht [P6].

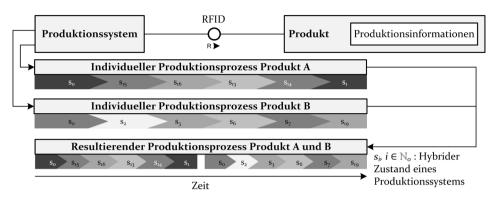


Bild 36: Methode für die vorausschauende Instandhaltung auf Basis einer modellbasierten Zustands- und Prozessüberwachung (angelehnt an [P6])

4.3.2 Systemeigenschaften

In Anlehnung an den Lösungsansatz gemäß dem Vorgängerkapitel und dem bestehenden Handlungsbedarf aus Kapitel 2.6 wird in diesem Abschnitt ein Framework entwickelt, das die Implementierung von Systemen der modellbasierten Zustands- und Prozessüberwachung standardisiert und an verschiedene Einsatzszenarien in emergenten CPS anpassbar ist. Auf Basis der Ergebnisse der Anforderungsanalyse des Projekts S-CPS können die Systemeigenschaften in die vier Kategorien Kerneigenschaften, Interoperabilität, Adaptivität und Anwendbarkeit eingeordnet werden [P12, P14][S15][20, 21, 23, 266, 268].

Die Kategorien stellen keine trennscharfe Definition dar. Beispielsweise ist der Grad der Anwendbarkeit eng mit den Aspekten der Interoperabilität verbunden, da sich Inkompatibilitäten erheblich auf den Implementierungsaufwand auswirken. Tabelle 10 fasst die geforderten Systemeigenschaften zusammen, bevor diese detailliert eingeführt werden.

Kerneigenschaften

Hinsichtlich der Kerneigenschaften bieten die Lösungsansätze von Van Tan et al. und Hästbacka et al. notwendige Mittel, um verarbeitete Daten aus der Zustandsüberwachung referenzarchitekturkonform mithilfe von OPC UA-Servern zu integrieren [222, 252]. Möglichkeiten für die variable Gestaltung der Informationsverarbeitung offerieren Dennert et al. mit dem Lösungsansatz, Informationen über einen lose gekoppelten, anwendungsinternen Datenbus ereignisgesteuert auszutauschen [257, 260]. Hierdurch ist die Möglichkeit der Separation einzelner Monitoring-Funktionalitäten auf dedizierte Ausführungsstränge und somit auch eine verbesserte Skalierbarkeit gegeben.

Tabelle 10: Zusammenfassung geforderter Systemeigenschaften der Monitoring Engine

Kerneigenschaften	Interoperabilität
Signal- sowie modellbasierte Zustands-	Unterstützung von:
und Prozessüberwachung	o RAMI4.o / I4.oK / VS
Variabilität der Anwendungsstruktur	o ISO 13374 / VDMA 24582
 Lose gekoppelte Systemkomponenten 	 Kommunikationsstandards
o Ereignisgesteuerte Daten- und	 Standardisierten Datenformaten
Informationsverarbeitung	 System- und Prozessmodellen
o Flexible Orchestration von Monitoring-	 Virtualisierungskonzepten
Prozessen und Diensten	 VS für Datenexport
Zwischenspeicherung von Daten zur	
Kompensation von Verbindungsabbrüchen	
Fähigkeiten zur zeitlichen Synchronisation	
über nicht-echtzeitfähige Kommunikations-	
standards	
Skalierbarkeit des Systems zur Laufzeit	
Unterstützung von Black Box-Modellen	
Adaptivität	Anwendbarkeit
Fähigkeit zur Selbstkonfiguration	Einfachheit bei Entwicklung /
Migrationskonzepte zur Anwendbarkeit in	Verteilung / Konfiguration
existierenden Produktionssystemen	Erweiterbarkeit
Beachtung von Aspekten des Datenaufkom-	Einheitliche Datenrepräsentation
mens	Browserbasierte Benutzeroberfläche
Berücksichtigung von emergentem Verhalten und Plug and Produce-Mechanismen	 Funktionsblockkonzept

Ein Initialisieren und Verknüpfen von Funktionsblöcken zur Systemlaufzeit ist notwendig, um die freie Konfiguration und Orchestration der informationsverarbeitenden Struktur zu erlauben. Bezüglich der Flexibilität und Emergenz von CPPS ist weiterhin die Chance zu berücksichtigen, Komponenten, Dienste, Datenpunkte und Modelle dynamisch hinzuzufügen oder zu entfernen. Hästbacka et al. fordern eine Lösung für die Zwischenspeicherung von Monitoring-Informationen für den effizienten Datenaustausch in Produktionsnetzwerken [222]. Die Etablierung eines Logikblocks für die Datenpersistenz stellt hierfür eine Möglichkeit dar [257, 258]. Es bleibt allerdings in Abhängigkeit des Anwendungsfalls zu erörtern, ob eine dezentrale, in jeden Funktionsblock separat integrierte Persistenzlogik vorzuziehen ist. Ein weiterer erforderlicher Aspekt ist die zeitliche Synchronisation von realen Produktions- und Modelldaten. Praktikabel erscheint hier die Annotation von Datenpunkten mit Zeitstempeln, welche auch Sreenuch et al. zu diesem Zweck nutzen [260]. Für die Zustands- und Prozessüberwachung sollen die identifizierten Black Box-Modelle der Modeling Engine nutzbar sein.

Interoperabilität

Bei der Systemgestaltung werden bisher eingeführte Interoperabilitätsstandards unterstützt (vgl. Kapitel 2). Konzepte für die Zustandserfassung sind für eine Realisierung von Zustands- und Prozessüberwachungsfunktionen essentiell. Neben dem Einsatz von Schnittstellenadaptern für Kommunikationsstandards ist die Herstellung einheitlicher Semantik eine weitere Aufgabe. Seilonen et al. propagiert den Lösungsansatz einer schemabasierten Transformation, der ein hohes Maß an a priori-Wissen impliziert [256]. Zu berücksichtigen sind insbesondere die Ergebnisse der Plattform Industrie 4.0 (vgl. Kapitel 2.1). Das Aufgabenspektrum der Funktionsbausteine beinhaltet eine Vielzahl von anwendungsspezifischen Funktionalitäten, wie die Kapselung von Anwendungslogik, Algorithmen und Programmbibliotheken. Eine Integration von informationstechnischen Diensten nach Ferreira et al. [317] gewinnt im Kontext verteilter CPS ebenfalls an Bedeutung. Die Isolierung von Anwendungen erfolgt mit Hilfe von Virtualisierungstechnologien, um Ausführbarkeit und Kompatibilität auf einer Vielzahl von Systemplattformen sicherzustellen [318].

Die Monitoring Engine soll den Anwender zur strukturierten Gestaltung von dezentralen Überwachungsarchitekturen befähigen. Hierfür müssen unterschiedliche Blockstrukturen einschließlich ihrer Schnittstellen im Sinne des Kombinationskonzepts von VDMA 24582 und ISO 13374 spezifiziert werden (vgl. Kapitel 2.2.4) [46–50]. Ergänzt werden Aspekte der Wandlung und Weiterentwicklung von informationsverarbeitenden Strukturen zur Abbildung maschineller Lernverfahren (vgl. Kapitel 2.2.3). Wesentlich ist die Integration einer VS für den Datenexport (vgl. Kapitel 2.1.4).

Adaptivität

Neben den Kerneigenschaften und Aspekten der Interoperabilität ist die Adaptivität des entwickelten Frameworks von entscheidender Bedeutung. Relevant sind Mechanismen zur Selbstkonfiguration in Anlehnung an Informationsmodelle zu überwachender Komponenten und die Verfügbarkeit von Migrationsstrategien zur Berücksichtigung vorhandener Anwendungslogik. Emergentes Verhalten sowie Plug and Produce-Mechanismen von CPS implizieren weiterhin ein hohes Maß an Wandlungsfähigkeit der Monitoring Engine. Da die Steuerung der Produktionsprozesse in der industriellen Praxis über die physisch gleichen Kommunikationsnetzwerke wie auch die Ausführung von Systemen der Zustands- und Prozess- überwachung erfolgt, wird deren Auslastung berücksichtigt. Monitoring Engines werden folglich dezentral instanziiert und für die Vorverarbeitung

von Steuerungsinformationen und Prozessvariablen auf Ebene der Komponenten verwendet. Eine initiale Konfiguration der Monitoring Engine ist über die Nutzung eines SDHA in der VS eines zu überwachenden Systems möglich (vgl. Kapitel 4.1). In Anlehnung an das Konzept *Plug and Produce* wird hier der Lösungsansatz *Plug and Monitor* eingeführt.

Anwendbarkeit

Ein weiterer Zweck der Monitoring Engine ist es, dem Anwender erweiterte Funktionalitäten der Zustands- und Prozessüberwachung komplexitätsreduziert zur Verfügung zu stellen. Standardisierte Methoden für Entwicklung, Verteilung und Konfiguration sollen die Implementierung in unterschiedlichsten Einsatzszenarien vereinfachen. In dieser Hinsicht bringt das von Binner entworfene Framework Restriktionen mit sich [191]. Der Lösungsweg von Dennert et al. sowie Sreenuch et al., die Informationsverarbeitung in Form einer Struktur verknüpfter Funktionsbaublöcke aus Konfigurationsdaten zu beziehen, schafft dagegen einen ungleich größeren Gestaltungsspielraum [257, 260]. Anwendungsinterne Modularisierung bzw. Kommunikation abseits von Schnittstellenadaptern ist ein Aspekt, der in den untersuchten Veröffentlichungen bislang nicht ausreichend definiert ist (vgl. Kapitel 2.4 bis 2.6). Weitere Aspekte der Anwendbarkeit umfassen eine einheitliche Datenrepräsentation sowie die Umsetzung plattformunabhängiger, browserbasierter Benutzeroberflächen. Bild 109 fasst die wesentlichen Funktionalitäten und Nutzergruppen der Monitoring Engine in einem Anwendungsfalldiagramm zusammen.

4.3.3 Referenzarchitektursicht

Aufbauend auf den Systemeigenschaften ist die Definition der Monitoring Engine in Anlehnung an den Lösungsraum von RAMI4.0 möglich. Hier umfasst das System Inhalte auf der *Instanz*-Ebene entlang der *Life Cycle & Value Stream*-Dimension. Analog zu Kapitel 4.2 wird der Aufbau entlang der Achse *Layers* beschrieben. Die Integration relevanter *Assets* erfolgt durch die Kommunikationsstandards OPC UA, HTTP und WS im *Communication Layer*. Neben OPC UA-basierten Informationsmodellen sind teilsysteminterne, objektorientierte Informationsmodelle und GraphML-Repräsentationen im *Information Layer* zu berücksichtigen. Auf funktionaler Schicht (*Functional*) geschieht die Abbildung von Funktionalitäten im Anwendungskontext, wie Zustands- und Prozessüberwachung, Diagnose und Funktionalitäten zur vorausschauenden Instandhaltung. In der Ebene des *Business Layer* wird die Realisierung einer modellbasierten Zustands- und Prozessüberwachung für CPS abgeschlossen. Zusammenfassend visualisiert Bild 37 den Systementwurf.

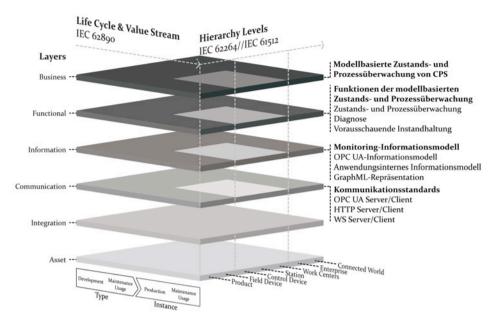


Bild 37: Modell der Monitoring Engine auf Basis von RAMI4.0, eigene Definition in Anlehnung an [P7][133]

4.3.4 Entwicklungssicht

Vordergründig hat die Monitoring Engine die Aufgabe, Systeme und Prozesse unter Nutzung identifizierter *System- und Prozessmodelle* zu überwachen. Aus den Systemeigenschaften und der Referenzarchitektursicht wird eine Entwicklungssicht abgeleitet (vgl. Bild 38). Nachfolgend werden die wesentlichen Komponenten des Systems definiert [P6-P9, P14, P15][S15].

Eingangs- und Ausgangsschnittstellen implementieren unterschiedliche Kommunikationsstandards und stellen Komponenten der Softwarearchitektur dar, deren Nutzung durch die Konfiguration der Condition Monitoring-Funktionsblöcke (CMFB) festgelegt wird. Die Verantwortlichkeit beschränkt sich dadurch auf die Methoden zur protokollspezifischen Kommunikation. Im Rahmen von Sozio-CPS bilden webbasierte Schnittstellen für die Anbindung browserbasierter Anwendungen (HTTP und WS) sowie OPC UA als industrieller Kommunikationsstandard eine sinnvolle Teilmenge aus der Vielzahl verfügbarer Kommunikationsstandards. Ein- und Ausgangsblöcke repräsentieren Funktionen für den Im- und Export von Daten und Informationen in die Informationsverarbeitung. Hierfür besitzt ein Eingangsblock nur eine Komponente zur Datenpublizierung, ein Ausgangsblock dagegen lediglich einen Datenkollektor, der Datenobjekte für die Nutzung im Datenbus bereitstellt.

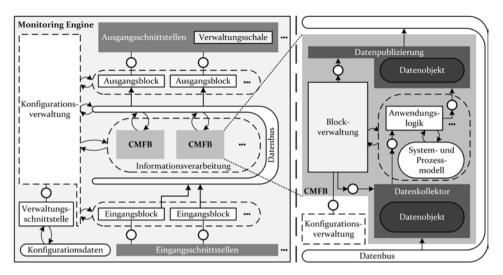


Bild 38: Entwicklungssicht der Monitoring Engine (links) sowie Detaillierung eines CMFB (rechts) (angelehnt an [P6, P8][S15])

Adapter stellen die Verbindung von Ein- und Ausgangsschnittstellen zu Ein- und Ausgangsblöcken her und werden zur Laufzeit durch die Blockverwaltung konfiguriert. Datenobjekte, die ein Ausgangsblock exportiert, können mehreren Ausgangsschnittstellen zur Verfügung gestellt werden. Gleichermaßen kann sich ein importiertes Datenobjekt aus Daten und Informationen zusammensetzen, die aus verschiedenen Datenquellen stammen und durch einen Eingangsblock zusammengeführt werden. Die freie Konfiguration sowohl von Schnittstellen als auch von Ein- und Ausgangsblöcken ermöglicht eine variable Einbindung der Monitoring Engine in das IoTS. Nachfolgend werden die wichtigsten Bestandteile detailliert.

Condition Monitoring-Funktionsblock

Die Abbildung der Anwendungslogik zur Zustands- und Prozessüberwachung erfolgt auf der Grundlage von *CMFB*, die zur *Informationsverarbeitung* vorgesehene Funktionen in separierte Prozesse kapseln. Eine dynamische Instanziierung dieser Architekturkomponenten erlaubt die Änderung der Spezifikation der *Informationsverarbeitung* der Monitoring Engine zur Laufzeit. Hierzu bezieht ein Block relevante Daten unter Nutzung von *Datenkollektoren* aus dem *Datenbus*, strukturiert diese und übergibt das *Datenobjekt* der eingebundenen *Anwendungslogik* zur Verarbeitung (vgl. Bild 38 rechts). Zurückgegebene Ergebnisse veröffentlicht ein Block über eine *Datenpublizierung* wiederum im *Datenbus*. Als verwaltendes Element eines *CMFB* gibt die *Blockverwaltung* vor, welche Informationen ausgetauscht werden und wie die Konvertierung zwischen Datenstrukturen zu

vollziehen ist. Weiterhin werden Methoden zur Verwaltung der CM-Funktionen sowie zur Konfiguration von Datenkollektoren und Datenpublizierungen durch die Konfigurationsverwaltung bereitgestellt. Im Gegensatz zu Datenkollektor und Datenpublizierung realisiert die Blockverwaltung eine Schnittstelle nach dem Request/Response-Prinzip, die nicht Teil des kontinuierlichen Informationsflusses ist. Zustände und Eigenschaften eines Blocks, welche über die Verwaltungsschnittstelle beeinflussbar sind, stehen für Datenkollektoren zur Verfügung. Die Datenpublizierung veröffentlicht von der Anwendungslogik zurückgegebene Ergebnisse. Einen Aufruf der Anwendungslogik führt ein Datenkollektor aus. Mögliche Auslöser sind das Eintreffen neuer Datensätze, eine Änderung zu übergebender Datenobjekte oder der Ablauf eines Zeitintervalls.

Alternativ zur nativen Implementierung der Anwendungslogik können Funktionalitäten zur Einbindung externer Dienste in die Informationsverarbeitung genutzt werden. Hierfür sind zusätzlich Aspekte der Synchronisation durch die Annotation von Metadaten wie die Vergabe von Zeitstempeln oder Aspekte der Nebenläufigkeit zu berücksichtigen. Verantwortlich für die Konfiguration der VS zum Datenexport ist die Blockverwaltung, die wiederum entsprechende Ausgangsdaten von der Konfigurationsverwaltung erhält. Im Rahmen der Initialisierung werden die CMFB instanziiert und in einem anwendungsinternen Blockregister gespeichert. Eine Vergabe von Bezeichnern erlaubt den Zugriff auf einzelne CMFB über die Konfigurationsverwaltung.

Datenpersistenz

Für den Zweck der Daten- und Informationspersistierung ist ein *Datenbankadapter* vorgesehen, der einen *Datenkollektor* und eine zur Laufzeit veränderbare *Persistenzlogik* umfasst. Die Interaktion mit nachgelagerten *Datenbanken* wird durch eine *Datenbankschnittstelle* abstrahiert. Bild 39 verdeutlicht, wie *Adapter* der *Ein*- und *Ausgangsblöcke* unterschiedliche Schnittstellen in der Monitoring Engine und Methoden für die Datenpersistenz bereitstellen.

Konfiguration

Als variables Framework für die Zustands- und Prozessüberwachung ist die Systemarchitektur der Monitoring Engine lösungsneutral und konfigurierbar zu definieren. Die Verantwortlichkeit dafür, eine Anwenderkonfiguration der drei dynamischen Komponenten der *Informationsverarbeitung*, also *CMFB* sowie *Ein*- und *Ausgangsblöcke* zur Laufzeit zu initialisieren, liegt bei der *Konfigurationsverwaltung*. In dieser wird eine

Organisation der dynamischen Struktur der Monitoring Engine durch das Initialisieren, Aktualisieren sowie Entfernen von *Blockinstanzen* zur Systemlaufzeit realisiert. Eine Änderung der *Konfigurationsdaten* kann dateibasiert lokal oder über eine *Verwaltungsschnittstelle* dienstbasiert erfolgen, bevor aktive *Blockinstanzen* angepasst werden. Den Zugriff auf die weiteren Methoden der *Konfigurationsverwaltung* wie das Pausieren von Blockaktivitäten stellt ebenfalls die *Verwaltungsschnittstelle* bereit. Zugriff auf Methoden der *Konfigurationsverwaltung* kontrolliert die VS. Eine *Konfigurationsverwaltung* erlaubt die Modifikation der *Systemkonfiguration* bzw. von *Ein*- und *Ausgangsblöcken* (vgl. Bild 40).

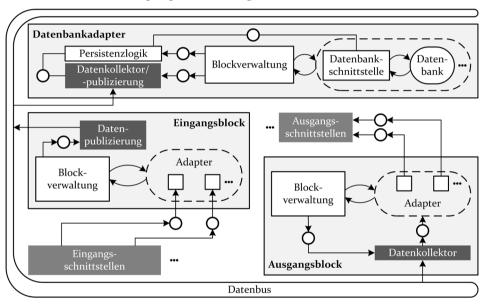


Bild 39: Aufbau von Ein- und Ausgangsblöcken sowie Datenbankadaptern als Schnittstellen der Informationsverarbeitung (angelehnt an [P6][S15])

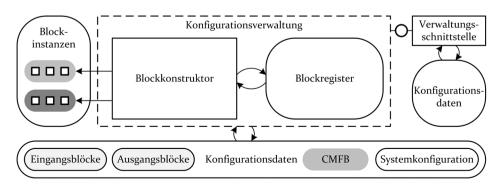


Bild 40: Konfigurationsverwaltung der Monitoring Engine (angelehnt an [P6])

Datenbus

Eine Kopplung der Komponenten der Informationsverarbeitung geschieht lose und dynamisch durch einen Datenbus, der das Hinzufügen und Entfernen von Bestandteilen der Informationsverarbeitung in der Monitoring Engine ermöglicht. Als Bezeichner für die kommunizierten Daten dient der Ereignisidentifikator, der in der Blockkonfiguration festgelegt wird. Für die Publikation von Daten wird die Methode emit des Datenbusobjektes genutzt (vgl. Bild 41). Der Datenkollektor abonniert benötigte Daten und Informationen, indem sich eine Datenakquisefunktion durch die Methode on auf den Ereignisidentifikator anmeldet. Eine Vereinheitlichung divergierender Datenstrukturen geschieht mittels der Definition geeigneter Schemata in den beteiligten Datenkollektoren. Sobald ein entsprechendes Ereignis ausgelöst wird, ruft ein Datenbus angemeldete Datenakauisefunktionen mit dem zu veröffentlichenden Datenobjekt als Argument auf. Dabei erlaubt eine Datenakquisefunktion, erhaltene Datenobjekte der Datenverwaltung des Datenkollektors zu übergeben. In der Konfiguration der Eingangsblöcke ist festzulegen, unter welcher Bezeichnung Datenobjekte zu veröffentlichen sind.

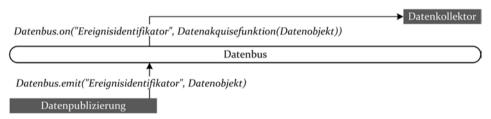


Bild 41: Ereignisgesteuerte Funktionsweise des Datenbus (angelehnt an [P6])

4.3.5 4+2-Sichtenmodell

Die Darlegung der Nutzenpotentiale der Monitoring Engine erfolgt in einem verdichteten Sichtenmodell. Unterschiedliche Perspektiven beim Systementwurf können hierdurch berücksichtigt werden. *Spies* thematisiert ebenfalls Sichtenmodelle, welche die Komplexität bei der Entwicklung und in der Verwaltung betrieblicher Informationssysteme reduzieren [319]. Weitere Sichten wurden im Projekt S-CPS entwickelt [P8][23, 24, 266, 268].

In diesem Zusammenhang wird das 4+1-Sichtenmodell nach *Kruchten* mithilfe der RAMI4.0-basierten Architektur zum 4+2-Sichtenmodell ergänzt [66]. Eine graphische Einordnung der Funktionen der Monitoring Engine hinsichtlich des 4+2-Sichtenmodells nimmt Bild 42 vor, bevor die einzelnen Sichten eingeführt werden.

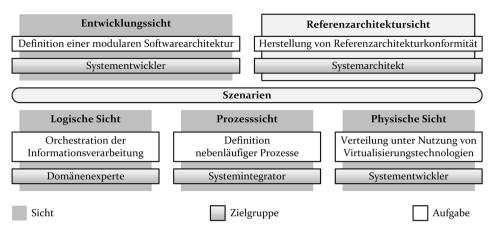


Bild 42: 4+2-Sichtenmodell für die Definition der Monitoring Engine als Erweiterung des 4+1-Sichtenmodells nach Kruchten (angelehnt an [P6][66])

Die Ansicht des Systementwicklers nimmt die *Entwicklungssicht* ein. Wichtige Kriterien sind die Bewertung von Wiederverwendbarkeit und Anpassungsfähigkeit. Aus Entwicklungssicht ist die Monitoring Engine insbesondere durch eine modulare Gestaltung gekennzeichnet. Abstrahierte Entwicklungsschnittstellen erleichtern es, das System um zusätzliche Funktionalitäten zu erweitern. Eine *Referenzarchitektursicht* fokussiert die ganzheitliche Definition im Spannungsfeld zwischen Informations-, Automatisierungs- und PLM-Systemen unter Ausnutzung der bereits eingeführten Vorteile (vgl. Kapitel 2.1.3).

Betrachtungsgegenstand der *logischen Sicht* ist die Interaktion des Automatisierungs- und Domänenexperten mit dem System. Hier stellt die Monitoring Engine ein Werkzeug für die flexible Orchestration von Abläufen der Informationsverarbeitung durch Konfigurationsanpassungen dar. Dabei spiegelt die Blockstruktur den Ansatz der Standards ISO 13374 und VDMA 24582 wieder, erweitert diese jedoch um Funktionalitäten wie eine ereignisgesteuerte interne Kommunikation zwischen Funktionsblöcken. Als generisch gestaltetes Framework gestattet es Anwendern die freie Gestaltung und Konfiguration von CM-Funktionalitäten.

Die *Prozessicht* thematisiert zeitlich veränderliche Eigenschaften eines Systems. Prinzipiell erlaubt der *Datenbus* die Unterstützung nebenläufiger Prozesse mittels entsprechender *CMFB*. Optionen zur Implementierung der Anwendungslogik auf mehrere Prozessorkerne bzw. Hardwareplattformen stellen einen Fortschritt im Vergleich zum Stand der Technik und Forschung dar. Somit sind auch ressourcenintensive Verfahren realisierbar. Eine Kommunikation erfolgt ebenso wie die Steuerung des systeminternen Datenflusses ereignisgesteuert. Die ineffiziente Funktionsausführung und

Datenabfrage in festen Zeitintervallen ist somit nicht notwendig [320]. Erreicht wird eine sinnvolle Ausnutzung von Hardware- und Netzwerkressourcen. Eine *physische Sicht* stellt den physischen Aufbau der Architekturkomponenten dar. Mit grundsätzlicher Kompatibilität zu Virtualisierungstechnologien kann die Nutzung der Monitoring Engine plattformunabhängig erfolgen, was eine Anpassung an Topologieveränderungen von CPS ermöglicht. Entgegen der VDMA 24582 sieht der verfolgte Ansatz keine klare Zuordnung von *CMFB* zu den Hardwarekomponenten der AP vor. Stattdessen werden der Aufbau von SOA und Aspekte der vertikalen Integration unterstützt.

Die Monitoring Engine ist für den Einsatz in unterschiedlichen *Szenarien* konzipiert. Folglich unterstützt sie ein breites Spektrum von der Anwendung bei der Überwachung einzelner Komponenten und Prozesse bis hin zur ganzheitlichen Zustandsüberwachung komplexer CPPS. Einfache Konfigurierbarkeit und Aktualisierungsfähigkeit erlauben die fortlaufende Weiterentwicklung von CM-Anwendungslogik und Modellen. Gemeinsam bilden Modeling Engine und Monitoring Engine ein Gesamtsystem, das im Vergleich zu bestehenden Lösungsansätzen Vorteile für den Einsatz innerhalb von emergenten CPS bietet. Das Zusammenspiel in Bezug auf die *Life Cycle & Value Stream* – Dimension bzw. den Lebenszyklus von zu überwachenden Entitäten stellt Bild 43 dar. Im nächsten Kapitel wird aufbauend auf Modeling Engine und Monitoring Engine ein Bedienkonzept für Sozio-CPS entwickelt.

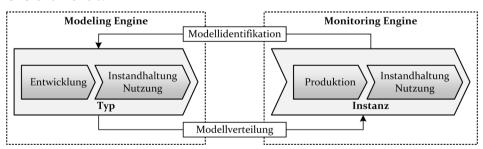


Bild 43: Definition von Modeling Engine und Monitoring Engine vor dem Hintergrund der Dimension Life Cycle & Value Stream in RAMI4.0 (angelehnt an [P6])

4.4 Bedienkonzept

Für die Akzeptanz von Sozio-CPS ist die Gestaltung adaptiver HMI von hoher Bedeutung, bleibt jedoch in Normen wie VDMA 24582 und ISO 13374 unberücksichtigt (vgl. Kapitel 2.6). *Göhringer, Michl* und *Sutanto* definieren dreidimensionale, browserbasierte Anwendungen, vernachlässigen jedoch Aspekte der Referenzarchitektur, semantischer Interoperabilität,

der Emergenz von zugrundeliegenden Systemen sowie Lösungsansätze für die automatisierte Generierung von HMI [195, 261, 321]. *Merhof* fokussiert die semantische Modellierung automatisierter Produktionssysteme zur Verbesserung der Integration zwischen Anlagenentwicklung und Steuerungsebene. Referenziert werden CAD und OPC UA-Daten zur Realisierung einer animierten, browserbasierten Visualisierung. AML als Referenzarchitekturstandard wird hierbei nicht eingesetzt [322]. *Schleipen* untersucht die Nutzung von AML im MES-Umfeld und stellt eine wichtige Grundlage für dieses Kapitel dar [175]. Analytische Informationssysteme und das Konzept der Operational Business Intelligence thematisieren ebenfalls die Komplexitätsreduzierung für den Menschen im Kontext von Industrie 4.0 [323]. Tabelle 11 grenzt das 3D-CPS-Konzept zum Stand der Technik und For-schung ab (vgl. Kapitel 2).

Zur Bewältigung dieser Herausforderungen wird eine Methode für die Generierung dreidimensionaler, browserbasierter HMI auf Grundlage von Daten, Information und Wissen des Engineering-Prozesses eingeführt. Das Bedienkonzept wird im Folgenden als dreidimensionales Visualisierungssystem zur modellbasierten Zustands- und Prozessüberwachung cyberphysischer Systeme (3D-CPS) bezeichnet. 3D-CPS ergänzt die in den Kapiteln 4.1 bis 4.3 eingeführten Systeme um eine plattformunabhängige graphische HMI und berücksichtigt ebenfalls eine Applikation in bestehenden Produktionssystemen. Bild 44 führt den zugrundeliegenden Entwurf

Tabelle 11: Abgrenzung des 3D-CPS-Konzepts zum Stand der Technik und Forschung

Stand der Technik und Forschung	3D-CPS-Konzept
Eingeschränkte Weiterverwendung von Daten aus dem Entwicklungsprozess für die Generierung von HMI	Durchgängige Weiterverwendung von Daten, Informationen und Wissen aus dem Entwicklungsprozess zur automatisierten Generierung von HMI
Unzureichende Adaptivität von HMI zur Laufzeit bei Plug and Produce-Konzepten	Berücksichtigung von Aspekten der Emergenz, Anpassung der Visualisierung gemäß dem betrachteten System
Fehlende Lösungsansätze zur ganzheitlichen Vernetzung von Produktionsressourcen, CPS, Systemen der Zustands- und Prozessüber- wachung und dem Menschen	Ganzheitliche Betrachtung von instandhaltungs- und überwachungsbezogenen Funktionen, Prozessen und Daten bei der Gestaltung von HMI
Uneinheitliche Verteilung von Anwendungslogik auf heterogene Visualisierungskomponenten	Nutzung einer standardisierten, übertragbaren Systemarchitektur bei der Entwicklung eines einheitlichen, verteilten Systems
Nichtbeachtung von Aspekten der Referenz- architekturkonformität und Vorzugs- standards bei der Gestaltung von HMI	Erforschung von HMI auf Basis der semantischen Interoperabilitätsstandards von RAMI4.0 (OPC UA / AML) für die Gestaltung von referenzarchitekturkonformen HMI

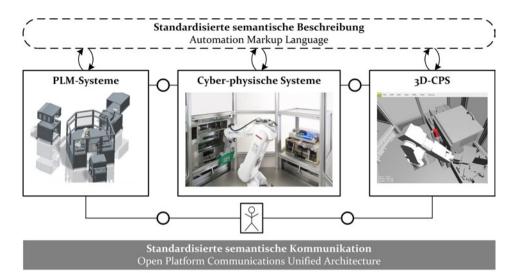


Bild 44: Bidirektionale Kopplung von 3D-CPS, PLM-Systemen und CPS auf Basis gemeinsamer Beschreibung und Kommunikation (angelehnt an [P11])

einer Kopplung von CPS, PLM-Systemen und dem Mensch als Bediener mittels 3D-CPS ein (vgl. Kapitel 2.1.4). Einleitend werden entsprechend den Ergebnissen des Projekts S-CPS und dem motivierten Handlungsbedarf in Kapitel 2.6 relevante Funktionen, Lösungsansätze bzw. Technologien definiert. Die Methodik zur Synthese einer RAMI4.0-kompatiblen Systemarchitektur wird nachfolgend beschrieben, an die sich eine Spezifikation von Teilsystemen anschließt. Aspekte der Konfiguration, Inbetriebnahme, Nutzung und Performanz werden im Lösungsansatz fokussiert. Abschließend erfolgt die Validierung der eingeführten Methodik anhand ausgewählter CPS als Anwendungsszenarien, bevor Potentiale zur Weiterentwicklung aufgezeigt werden. Weitere Details wurden im Rahmen einer Veröffentlichung bereits behandelt [P11].

4.4.1 Lösungsansatz

Vordergründig benötigen Anwender für die Betriebsführung Informationen zum Status von Anlagen, deren Komponenten sowie Produktionsprozessen. 3D-Visualisierungen erlauben hier eine präzise Lokalisierung von Daten und Informationen in der Systemtopologie. Zusammenfassend ergeben sich die in Tabelle 12 aufgeführten Gestaltungsaspekte sowie die im Rahmen von 3D-CPS verwendeten Lösungsansätze.

Entsprechend dem Vorzugsstandard zur Feldgeräteanbindung FDI gemäß Kapitel 2.1.4 sind Baugruppen und Modulstrukturen hierarchisch zu visualisieren. Zweckgebunden müssen Modelle, Anomalien, Diagnosen,

Handlungsanweisungen und weitere Dokumente den Komponenten präzise zuordenbar sein. Eine Unterstützung von Aspekten der Interoperabilität wird durch eine plattform- und systemunabhängige Konzeption von 3D-CPS angestrebt. Abgeleitet aus dem Systemzweck und den Ergebnissen des Projekts S-CPS sind Aspekte der Konfiguration, die Emergenz und Adaptivität von CPS Rechnung tragen, entscheidend [P8][20, 21]. Die Inbetriebnahme und Adaption an zur Laufzeit veränderliche Systemtopologien soll daher allein durch die Manipulation von Konfigurationsdateien und nicht durch Änderungen am Quelltext erfolgen. Aus den Gestaltungsaspekten und Lösungsansätzen sowie RAMI4.0 ist eine Systemarchitektur synthetisierbar, die im nächsten Kapitel und einem Anwendungsfalldiagramm erläutert wird (vgl. Bild 110).

Tabelle 12: Aspekte und Lösungsansätze zur Gestaltung von 3D-CPS, eigene Darstellung in Anlehnung an das Förderprojekt S-CPS [P8][20, 21]

Gestaltungsaspekt	Lösungsansatz
Plattformunabhängige Implementierung zur Nutzung auf variablen Endgeräten	Einsatz von browserbasierten Technologien
Dreidimensionale Visualisierung von Gegenständen sowie kontextsensitive Bereitstellung von Anomalien, Diagnosen	Verwendung der Vorzugslösungen AML und OPC UA unter Nutzung responsiver JS-Frame- works sowie Integration der Monitoring Engine
Unterstützung von Wandlungsfähigkeit bzw. dynamischer Systemtopologien induziert durch Plug and Produce-Mechanismen	Realisierung von Funktionalitäten zur asynchronen, ereignisgesteuerten Aktualisierung visualisierter AML- Repräsentationen
Herstellung von RAMI4.o-Konformität	Bildung einer VS unter Nutzung von AML und OPC UA sowie Architekturgestaltung entsprechend RAMI4.0
Effiziente Einrichtung und Konfiguration mit einem minimalen Maß an Expertenwissen	Parametrisierung unter Verwendung der Vorzugslösung AML
Flexible Einbindung von Datenquellen zur Verknüpfung mit Elementen der 3D- Visualisierung	Verwendung der Vorzugslösungen AML und OPC UA
Bidirektionale Kommunikation zwischen Browser und vorgelagerten Systemen	Einsatz des WS-Kommunikationsstandards
Einfache Portier- und Erweiterbarkeit	Nutzung von Virtualisierungstechnologien und Verwendung modularer Standardbibliotheken
Performanz bei der browserseitigen Daten- und Informationsverarbeitung	Implementierung unter Nutzung eines parallelisierten Referenzierungskonzepts, das die effiziente Verarbeitung verknüpfter Geometriedaten erlaubt

4.4.2 Referenzarchitektursicht

Für die Gestaltung von 3D-CPS existiert kein Vorzugsstandard, der die integrierte, browserbasierte und dreidimensionale Visualisierung von Daten und Informationen einer Zustands- und Prozessüberwachung umfassend erlaubt. 3D-CPS basiert daher auf einer Kombination von Vorzugsstandards aus dem Bereich der Informations-, Automatisierungs-, und PLM-Technologie. Die resultierende Systemarchitektur für die Konfiguration, Gestaltung und Implementierung dreidimensionaler, browserbasierter Visualisierungssysteme ist in Bild 45 modelliert.

Nachfolgend wird die Zuordnung der Systemkomponenten entlang der RAMI4.0-Dimension *Layers* erläutert. Die Nutzung von AML und OPC UA sowohl in der Typerstellung als auch in der Anbindung von Instanzen beinhaltet die *Life Cycle & Value Stream*-Dimension vollständig. In der *Asset*-Schicht erfolgt die Integration des Menschen durch die Nutzung von 3D-CPS in der *Enterprise*- bzw. *Connected World*-Ebene sowie von Maschinen und Anlagen von *Field Device* bis *Work Centers* der Dimension *Hierarchy Levels*. Eine Einordnung der konkreten HMI geschieht in der Schicht *Integration*. Diese umfasst hinsichtlich *Hierarchy Levels*-Achse einen identischen Abschnitt zur *Asset*-Schicht.

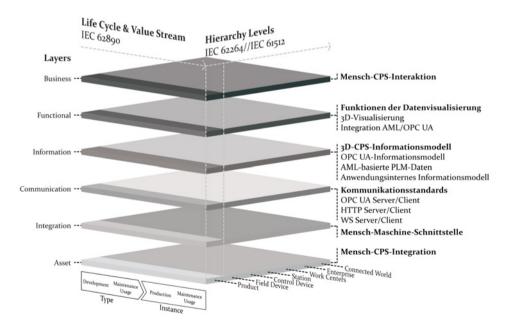


Bild 45: Modell von 3D-CPS auf Basis von RAMI4.0, eigene Definition in Anlehnung an [133]

Zur Auflösung der Limitierungen einer heterogenen Softwarelandschaft und herstellerspezifischen Datenformaten wird eine VS für die Konfiguration des Visualisierungssystems gebildet. In der Schicht Communication geschieht die Kommunikation der Instanzen von Field Devices bis Connected World, während passive Gegenstände nicht fokussiert werden. Referenzarchitekturkonform wird für die Integration emergenter Teilsysteme der Vorzugsstandard OPC UA eingesetzt. Durch die Möglichkeit des dynamischen Hinzufügens von weiteren OPC UA-Servern wird ein hohes Maß an Skalierbarkeit erreicht. Webbrowser als Anwendungsplattform bedingen, neben den RAMI4.o-Vorzugsstandards, die Nutzung weiterer Kommunikationsstandards aus der Domäne der IT. Eine Verbindung von Webbrowser und -server für die Bereitstellung und Anbindung der Browseranwendung wird unter Nutzung der W3C-Kommunikationsstandards HTTP und WS realisiert. Als Alternative zu OPC UA bieten diese kein semantisch einheitliches Informationsmodell zur virtuellen Repräsentation von I4.oK [299, 324]. Entsprechend Kapitel 2.1.2 fordert die Umsetzung flexibler Systeme auf Ebene der Implementierung die Realisierung einzelner Agenten, die eine lose Kopplung auf Basis von Publish/Subscribe-Bussystemen unterstützen.

Bezüglich der Schicht Information sind neben den AML- und OPC UAbasierten Informationsmodellen auch anwendungsinterne Datenstrukturen einzuordnen. Hinsichtlich der Dimension Life Cycle & Value Stream umfasst dies eine Abbildung von PLM-Daten und OPC UA-basierten Typklassensystemen im Type-Bereich sowie die Nutzung und Wartung dieser Modelle auf realen Instances. Die Informationsmodelle in OPC UA und das konsolidierte Datenformat AML dienen einer effizienten Konfiguration von 3D-CPS. Schnittstelle zum durchgängigen Engineering stellen AML-Repräsentationen dar, auf deren Grundlage neue Elemente aufwandsarm in 3D-CPS integrierbar sind. AML ist damit sowohl in der Entwicklung der Types als auch in der Instance-Phase über den kompletten Lebenszyklus eines CPS von Relevanz. Neben dem Rahmenformat CAEX ist für die Darstellung von dreidimensionalen physischen Gegenständen das Datenformat COLLADA essentiell. Herstellung von Interoperabilität zwischen Informationsmodellierung in OPC UA und AML erfolgt entsprechend Kapitel 2.1.4 gemäß DIN SPEC 16592 [185]. Die Forderung nach flexibler Konfiguration bedingt die Notwendigkeit der Entwicklung einer AMLbasierten Funktionalität, die eine effiziente Systemeinrichtung ohne Quelltextmodifikation erlaubt. Eröffnet wird die Möglichkeit zur Implementierung von Self-X-Fähigkeiten, die Aspekte von Wandlungsfähigkeit zur Laufzeit unterstützen. Veränderte Anlagenbereiche sind damit entlang

der Dimension *Life Cycle & Value Stream* zu berücksichtigen. Die Funktionalität der 3D-Visualisierung wird schließlich in der Schicht *Functional* abgebildet. Aufgrund der ganzheitlichen Adressierung von Systemen der Informations- und Automatisierungstechnologie findet die Modellierung abgesehen von der Hierarchieebene *Product* unter der vollständigen Nutzung der Dimensionen *Layers, Hierarchy Levels* sowie *Life Cycle & Value Stream* statt. Schließlich wird die Mensch-CPS-Interaktion auf *Business*-Ebene dargestellt.

4.4.3 Entwicklungssicht

Aufbauend auf der Referenzarchitektursicht ist eine mehrteilige Architektur synthetisierbar (vgl. Bild 46). Entsprechend des eingeführten Migrationssowie I4.oK-Konzepts in Kapitel 4.1 erfolgt eine Datenakquise, die eine variable Anzahl an OPC UA-Servern sowie weitere Systeme, wie die Modeling Engine oder die Monitoring Engine beinhaltet. Ein Agent 3D-CPS Server dient der Bereitstellung von 3D-CPS Client-Anwendungen für Endgeräte sowie der Weiterleitung von Laufzeitdaten und AML-Repräsentationen an die Instanzen des 3D-CPS Clients. Der Bereich 3D-CPS Client steht für eine Applikation, über die der Benutzer mit dem Sozio-CPS interagiert.

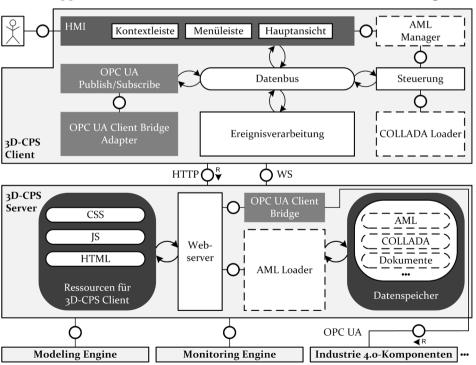


Bild 46: Entwicklungssicht von 3D-CPS (angelehnt an [P11])

Im weiteren Verlauf des Kapitels wird die Systemgestaltung im Rahmen einer Dekomposition des Gesamtsystems vorgenommen. Die Einbindung des Menschen in das Sozio-CPS durch kontextsensitive Darstellung von Systeminformationen erlaubt die Browseranwendung 3D-CPS Client. Um Flexibilität und Erweiterbarkeit sicherzustellen, ist die Anwendungslogik im 3D-CPS Client in einzelne Module gekapselt. Eine Kommunikation zwischen diesen Modulen findet mit Hilfe definierter Nachrichten statt, die ereignisgesteuert mittels eines applikationsinternen Datenbus ausgetauscht werden. Hieraus resultiert die Möglichkeit, neue Module in den 3D-CPS Client zu integrieren bzw. auszutauschen, ohne das Anpassungen an vorhandenen Modulen erforderlich sind. Ergänzend wird das Teilsystem OPC UA Client Bridge Adapter zur Bereitstellung einer übergreifenden OPC UA-Kommunikationsmöglichkeit eingesetzt. Die Verbindung von AML-Repräsentation, COLLADA-Dateien und OPC UA-Daten findet durch Interpretation einer standardisierten, semantisch einheitlichen Beschreibung statt.

Auf Basis der Komponente Steuerung erfolgt eine Initialisierung dieser Funktionalität, die serverseitige Komponente AML Loader fordert AML-Repräsentationen an und übergibt diese an den Agent AML Manager. Letztgenannter verwaltet diese Inhalte und stellt Methoden zur Abfrage von Objekten und Datenstrukturen zur Verfügung. Komponenten des 3D-CPS Clients nutzen die Schnittstelle, um die Struktur selektierter AML-Objekte anzuzeigen. Ergänzend werden an dieser Stelle referenzierte COLLADA-Dateien im Rahmen der AML-Verarbeitung identifiziert und dem COLLADA Loader zur asynchronen Abfrage der Referenzen übergeben. Weiterhin lässt die Verknüpfung der AML-Repräsentation, der COL-LADA-Dateien und der OPC UA-Daten auf Basis eines Referenzierungskonzepts, eine durchgängige und redundanzfreie, dreidimensionale Visualisierung realer Anordnungen und Systemtopologien zu. Eine Ereignisverarbeitung erlaubt die Visualisierung von Anomalien und Diagnosen sowie die Quittierung durch den Nutzer. Schließlich enthält der Agent HMI die Komponenten Kontext- und Menüleiste sowie Hauptansicht zur graphischen Visualisierung der Inhalte.

Bezüglich der Struktur des 3D-CPS Servers sind drei Agenten wesentlich. Stammdaten physischer und virtueller Gegenstände verwaltet ein zentraler Datenspeicher. Neben den AML-Repräsentationen umfassen diese referenzierte Daten, wie COLLADA-Dateien, Dokumentationen, Handlungsanweisungen als auch identifizierte SDHA der Modeling Engines oder Referenzen auf weitere Dateien. Der Agent AML Loader ist für eine Vorverarbeitung zuständig und kommuniziert entsprechende Daten direkt an den

3D-CPS Client. Ereignisgesteuerter Austausch von Anlagenbestandteilen in Anlehnung an das Plug and Produce-Paradigma erfordert hierbei das Einlesen und Zusammenführen von AML-Repräsentationen zur Laufzeit des Systems. Parallel stellt der Bereich Webserver die für den 3D-CPS Client notwendigen statischen Daten, wie Webseite (HTML), Formatierung (Cascading Style Sheets - CSS), Anwendungslogik (JS) und Inhalte im Datenspeicher bereit. Typischerweise erfolgt die Kommunikation unter Nutzung von HTTP und WS. Eine Serverkomponente der OPC UA Client Bridge ist das Gegenstück zum browserbasierten OPC UA Client Bridge Adapter. Als bidirektionaler, WS-basierter Kommunikationskanal behandelt dieser den Informationsrückfluss durch Benutzereingaben. Weiterhin ist das Modul für die Kommunikation und Akquise von Daten vorgelagerter Systeme zuständig. Neben OPC UA ist an dieser Stelle ebenfalls die Unterstützung von HTTP und WS mittels einer Implementierung möglich. Aus physischer Sicht sind die Hauptkomponenten 3D-CPS Server, 3D-CPS Client sowie die vorgelagerten Systeme in Anlehnung an existierende Virtualisierungskonzepte unabhängig ausführbar (vgl. Bild 47) [318]. Denkbar sind Szenarien, in denen Webserver auf skalierbaren, cloudbasierten Servern installiert sind und der AML Loader aus Gründen der Informationssicherheit in einem gesicherten, unternehmensinternen Netzbereich betrieben wird. Zur Validierung des Konzepts wurden 3D-CPS Server und 3D-CPS Client auf Basis der Node.js-Plattform bzw. des Google Chrome Webbrowsers realisiert [298, 300, 325]. Nachfolgend wird die Visualisierungs- und Kernelementgestaltung des Agenten HMI vertieft.

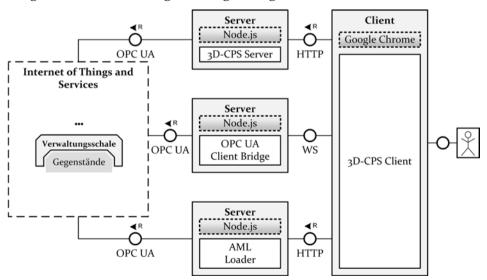


Bild 47: Physische Sicht auf 3D-CPS (angelehnt an [P11])

4.4.4 Visualisierungs- und Kernelementgestaltung

Grundlegend umfasst die Benutzeroberfläche Funktionalitäten zur Modifikation graphischer Elemente verteilt auf Visualisierungsszenen, die jeweils Hauptansicht, Menü- und Kontextleiste enthalten. Eine Menüleiste bietet anwendungstypische, generische Funktionalitäten wie die Einstellung endgerätespezifischer Ansichten. Weiterhin differenziert die Kontextleiste zwischen Obiektbrowser, AML bzw. OPC UA-basierten Daten und Ereignisspeicher. Dabei stellt der Obiektbrowser AML-basierte, hierarchische Strukturen dar. Verschiedene Objekttypen sind durch farbliche Kennzeichnung unterscheidbar. Ist ein Objekt in der Visualisierungsszene selektiert, werden Informationen unter Nutzung der OPC UA Client Bridge kontextuell abgerufen und angezeigt. Im Fall einer spezifischen Anlagenkomponente sind dies in der AML-Repräsentation verknüpfte OPC UA-Daten und deren Attribute sowie die Anzeige und Quittierung detektierter Anomalien, Ereignisse und Diagnosen. Die browserbasierte Visualisierung objektbezogener Dokumente erfolgt in einer Kontextleiste, die Handlungsanweisungen oder Dokumentationen enthält, welche wiederum in der AML-Repräsentation verknüpft sind. Sofern aktiviert, werden Prozessvariablen und Steuerungsinformationen in Overlays angezeigt, die intuitiv positionierbar sind. In Bild 48 ist die Benutzeroberfläche von 3D-CPS dargestellt.

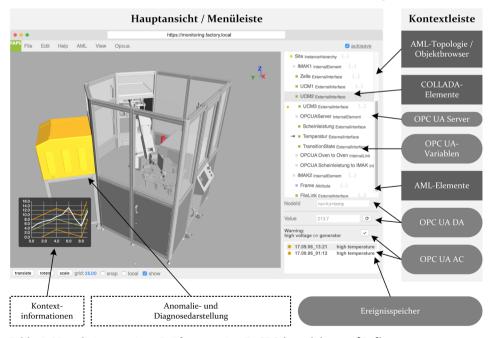


Bild 48: Visualisierung eines Prüfsystems in 3D-CPS (angelehnt an [P11])

Für die Verarbeitung empfangener Ereignisse ist das in Bild 49 skizzierte, Modul *Ereignisverarbeitung* verfügbar. Bei Detektion eines Ereignisses wird dieses auf Basis des bereits eingeführten Publish/Subscribe-Entwurfsmusters publiziert und löst auf den beziehenden *Menüleisten* einen Vorgang zur Aktualisierung der Visualisierung aus. Wesentlich ist hierbei die Unterstützung des RAMI4.0-Standards OPC UA AC entsprechend Kapitel 2.1.4. Das Eintreten eines Ereignisses führt zur Einfärbung des verknüpften visualisierten Gegenstands und nutzt dabei die Konventionen der VDMA 24582 [46]. Mit der Selektion des Elements sind im Meldungsbereich weitere Metadaten zu den Meldungen einsehbar. Ist ein Fehler behoben bzw. die Ursache für eine Anomalie identifiziert, kann die Meldung quittiert und somit aus der Liste der Meldungen und dem OPC UA Server entfernt werden. Zur Rückführung des Benutzerwissens sind entsprechend dem Sozio-CPS-Konzept Handlungsanweisungen erstellbar, deren Persistierung im *Datenspeicher* des 3D-CPS Server erfolgt.

Die Forderung nach einer performanten, dreidimensionalen Browser-anwendung bedingt die Nutzung der Web Graphics Language (WebGL) als technologische Basis für die weitere Spezifikation. WebGL offeriert eine JS-basierte Programmierschnittstelle für die dreidimensionale Datenvisualisierung [326]. Eine WebGL-Repräsentation wird grundsätzlich unter Angabe von Geometrie, Material und Licht determiniert. Zur Darstellung AML-basierter, dreidimensionaler Inhalte ist die Verarbeitung und Anzeige des COLLADA-Datenformats notwendig. Existierende WebGL-Bibliotheken verfügen über Parser-Implementierungen, die einen wesentlichen Teil der COLLADA-Spezifikation abdecken und damit eine potentielle Ausgangsbasis für die Verarbeitung von AML darstellen [327, 328].

Die Erweiterung um eine Funktionalität der Dateireferenzierung erlaubt eine Verwaltung zusammengesetzter AML-Inhalte. Initial wird eine Hauptdatei analysiert, welche über Referenzen weitere COLLADA-Inhalte zur Reduzierung der Komplexität und Einzeldateigröße einbindet.

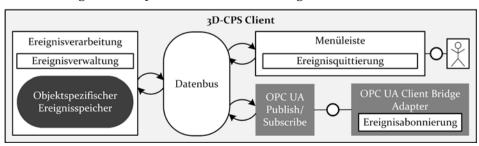


Bild 49: Ereignisverarbeitung in 3D-CPS (angelehnt an [P11])

Eine Interpretation der COLLADA-Inhalte findet im 3D-CPS Client statt. Zur Unterstützung dynamischer Topologien von CPS ist ein Mechanismus notwendig, mit dem Bestandteile der WebGL-Szene ohne einen Neustart der Anwendung veränderbar sind. Hierfür wird eine Programmbibliothek zur Interpretation dieses Schemas eingeführt [328]. Aufbauend auf der COLLADA-Referenzierung ist eine Verbindung mit vorgelagerten Datenquellen möglich. Mit Hilfe der AML-spezifischen InternalLink-Funktionalität sind Objekte im Datenspeicher bzw. der AML-Repräsentation verknüpfbar. Neben der Verwendung von Basiselementen erfolgt die Verbindung durch Annotation von *OPCTaq*-Attributen. Die Herstellung von Relationen zwischen beliebigen Elementen ist wesentliche Grundlage zur Anzeige von Informationen im Zusammenspiel mit einem dreidimensionalen Visualisierungssystem. Bild 50 zeigt einen exemplarischen Ausschnitt einer AML-Repräsentation zur Verdeutlichung des Konzepts [P11]. Zusammenfassend ist eine Methode zur Implementierung von I4.oK-Visualisierungssystemen synthetisierbar, die den Workflow von der Erstellung einer AML-Repräsentation über das Referenzierungskonzept bis zur Erzeugung anwendungsinterner Referenzen umfasst (vgl. Bild 51). Da OPC UA als RAMI4.0-Vorzugsstandard zur Feldgeräteintegration nicht zur direkten Kommunikation von I4.0K und Webbrowsern vorgesehen ist, bedarf es eines Verfahrens, das OPC UA-basierte Daten und Informationen zur Verarbeitung für browserbasierte Applikationen kapselt.

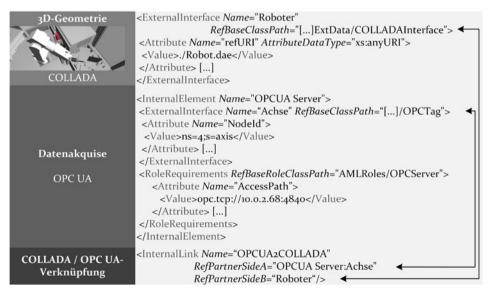


Bild 50: Verknüpfung von AML-Objekten, COLLADA 3D-Geometrien, zugehöriger Daten bzw. Informationen und vorgelagerter OPC UA Server

Unter Verzicht auf redundante Konfigurationsmechanismen etabliert das Modul *OPC UA Client Bridge* Verbindungen zu vorgelagerten OPC UA-Servern von I4.0K (vgl. Bild 52). Hierzu gehört das Einrichten von *Sessions, Subscriptions* und *Monitored Items* [160]. Eine Reduzierung der Systemlast und des Datenaufkommens, bedingt durch den Zugriff diverser *3D-CPS Clients* auf identische Ressourcen, wird mittels effizienter Zwischenspeicherung und Wiederverwendung einzelner *Subscriptions* erreicht. Nach dem Konzept ferner Prozeduraufrufe wird der OPC UA Server durch den *3D-CPS Client* gesteuert [160]. Für die Umsetzung der Funktionalitäten der *Verbindungsverwaltung* von OPC UA-Verbindungen sowie der WS-basierten *Netzwerkkommunikation* wird auf die Software-Bibliothek Socket.IO zurückgegriffen [329]. Ein hohes Maß an Interoperabilität zwischen der Client- und Serverkomponente der *OPC UA Client Bridge* induziert die Nutzung von Mechanismen, die Methodenaufrufe und Parameter serialisieren und mittels WS-Verbindungen an den Server senden (vgl. Bild 53).

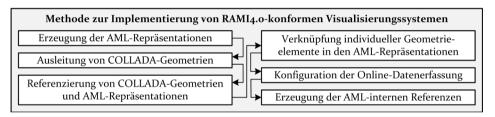


Bild 51: Entwickelte Methodik zur Generierung von RAMI4.0-konformen Visualisierungssystemen (angelehnt an [P11])

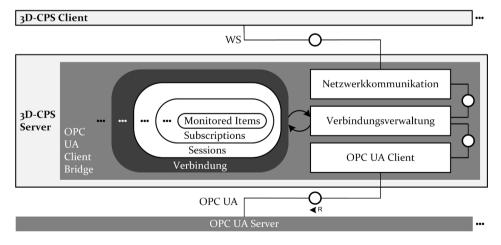


Bild 52: Systemarchitektur der OPC UA Client Bridge (angelehnt an [P11])

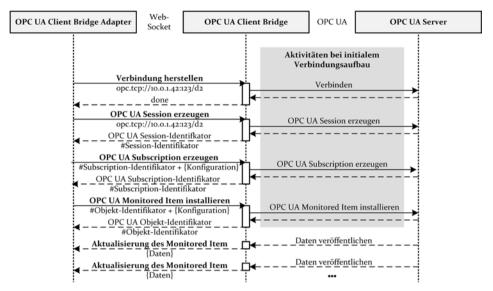


Bild 53: Interaktion von OPC UA Client Bridge Adapter, OPC UA Client Bridge und OPC UA Server (angelehnt an [P11])

4.5 Verbesserung von Diagnosefähigkeiten

Die stetige Verbesserung des Überwachungs- und Instandhaltungsprozesses durch kontextbezogene Annotation von Metadaten erfolgt auf Basis eines Diagnosesystems für cyber-physische Systeme (D-CPS). Der Mensch zeichnet sich durch sein Problemlösungsvermögen und Flexibilität aus, was es ihm ermöglicht auf unvorhersehbare Situationen entsprechend zu reagieren (vgl. Kapitel 2.3). Modellbildung, Analyse und Diagnose werden in Modeling Engine und Monitoring Engine durchgeführt sowie diagnostizierte Fehler und Handlungsanweisungen an Stakeholder übermittelt. Die Rückmeldung ist jedoch ein wichtiger Bestandteil für Bewertung und Verbesserung eines lernenden Systems (vgl. Kapitel 2.2.3). In einem ersten Schritt werden nicht erkannte Fehler proaktiv in Trainingsdaten zur Nutzung in maschinellen Lernprozessen annotiert, was einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung von Diagnosefähigkeiten und zur Identifikation von Ursache-Wirkungsbeziehungen darstellt. Eine Reflektion und Verknüpfung von Anomalien, Diagnosen und Reparaturanweisungen durch den menschlichen Bediener ist die Grundlage für eine weitere Verbesserung des Gesamtsystems. Auf Basis der Erzeugung und Modifikation von Fehlerbeschreibungen und Handlungsanweisungen kann Wissen formalisiert werden (vgl. Bild 54). Fokussiert wird die Rolle des Instandhalters. Ausgangspunkt hierfür sind Konzepte des Wissensmanagements im Umfeld der Zustands- und Prozessüberwachung [217].

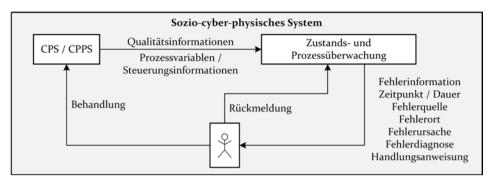


Bild 54: Rückführung des menschlichen Erfahrungswissens zur fortlaufenden Verbesserung von Diagnosefähigkeiten [P8, P9]

Die Strukturierung und Bezeichnung einzelner Elemente folgt der Ontologie von Fehler-Ursachenbeziehungen nach Michl [195]. Ein wichtiger Schritt umfasst dabei die Transformation von individuellem, implizitem Wissen in explizites, kollektiv nutzbares Wissen durch das Konzept der Wissensspirale nach Nonaka und Takeuchi [330]. Die Fehlerbehandlung in automatisierten Montagesystemen thematisiert Heller [331]. Reidt beschreibt die Verknüpfung von herstellerspezifischen und standardisierten Fehlerkodierungen [266]. Bild 55 zeigt die Entwicklungssicht des Systems und dessen Eingliederung in den Gesamtentwurf. Relevante 14.0K, 3D-CPS, Modeling Engine und Monitoring Engine sowie existierende Systeme der Zustands- und Prozessüberwachung werden berücksichtigt. D-CPS führt erkannte Fehler, Anomalien und Instandhaltungszeitpunkte zusammen und integriert Fehlerbeschreibungen, Handlungsanweisungen sowie Modelle mittels Methoden der Datenfusion [P8]. Hierfür sind semantische Technologien von Bedeutung (vgl. Kapitel 2.1.4). D-CPS Client steht für den browserbasierten Anteil der Anwendungslogik, während D-CPS den serverseitigen Anteil repräsentiert. Für die konkrete Verbesserung der Klassifikationsfähigkeiten stellen Nutzereingaben eine geeignete Möglichkeit dar [P8][S4, S25]. Bild 56 verdeutlicht das Konzept einer Sozio-CPS-basierten Zustandsüberwachung, in der ein Sozio-CPS-Klassifikator Fehlerwahrscheinlichkeiten berechnet und damit über die Notwendigkeit von Instandhaltungsmaßnahmen entscheidet. Die Erzeugung dieses Sozio-CPS-Klassifikators erfolgt in der Modeling Engine. Bestimmte Kombinationen bzw. zeitliche Abfolgen von Prozessvariablen und Steuerungsinformationen können um Nutzereingaben als entsprechende Zielwerte für ein überwachtes Lernen von Klassifikatoren erweitert werden (vgl. Kapitel 2.2). Weiterführende Untersuchungen sowie Details zu Fehlerbeschreibungen und Handlungsanweisungen sind im Kontext des Projekts S-CPS bereits veröffentlicht [P8, P9][266]. Bild 111 fasst die Anwendungsfälle zusammen.

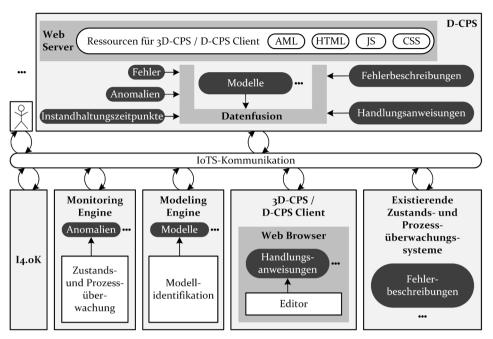


Bild 55: Entwicklungssicht des D-CPS im Kontext der definierten Systeme

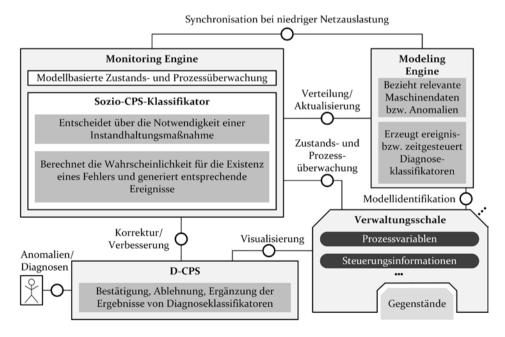


Bild 56: Konzept für die Abbildung klassifikationsbasierter Fehlerdiagnose im Kontext von Sozio-CPS (angelehnt an [P6-P8][266])

4.6 Optimierungskonzept

Die bisher eingeführten Systeme des Sozio-CPS fokussieren die modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung. Die Migrationsstrategie auf Basis der VS stellt Kompatibilität mit existierenden und neu zu planenden Systemen sicher und impliziert geringe Einführungsaufwände. Für eine weitere Effizienzsteigerung ist jedoch ein aktiver Eingriff in die Steuerung und Konfiguration der überwachten Systeme im Sinne einer Optimierung der klassischen Zielgrößen Zeit, Kosten, Qualität und Energie erforderlich [332]. Während der Mensch Zielgrößen und Rahmenbedingungen vorgibt, soll eine Parameteroptimierung von CPS durch Self-X-Fähigkeiten unterstützt werden (vgl. Kapitel 2.1.2). Für die Selbstoptimierung von intelligenten technischen Systemen sind Lösungsansätze im Stand der Technik und Forschung vorhanden [111, 265, 333–339]. Handlungsbedarf besteht im Bereich von Lösungsansätzen, die semantische Interoperabilitätsstandards und Referenzarchitekturkonformität berücksichtigen.

Vor dem Hintergrund der definierten Themenstellung soll evaluiert werden, welchen Beitrag die entwickelten Systeme und Teilsysteme leisten können. Bild 57 führt ein Konzept ein, das die bisherigen Lösungsansätze um Aspekte der Selbstoptimierung erweitert und nachfolgend erläutert wird. Ein *reflektorischer Operator* erlaubt das echtzeitfähige und effiziente Verarbeiten von Daten entlang deterministischer Logikpfade in einem reflektorischen Kreis. Neben steuernden und regelnden Funktionalitäten werden die Anwendungslogiken der Monitoring Engine vordergründig diesem Agenten zugeordnet.

Die Modellidentifikation und die Systemoptimierung erfolgen vordergründig in einem *kognitiven Kreis*. Hierfür ist ein *kognitiver Operator* von Bedeutung, der nur weichen Echtzeit anforderungen unterliegt und die Auswahl von Steuerungsparametern in Abhängigkeit zu optimierender Zielgrößen vornimmt. Maßnahmen zur Optimierung durch kognitive Regulierung setzen die Verfügbarkeit maschinenlesbarer, semantisch einheitlicher Informationen sowie von Verhaltens- und Systemmodellen voraus. Eine konfigurationsspezifische Erhebung von *Prozessvariablen*, aktiven *Teilprozessen* und *Zeitinformationen* kann durch VS erfolgen. Die Modeling Engine ist Ausgangspunkt für eine Applikation maschineller Lernverfahren zur Identifikation von SDHA. Auch in diesem Kontext sind 3*D-CPS*, *D-CPS* sowie weitere anwendungsspezifische *HMI* zur Wahl des Optimierungsziels im Rahmen *IoTS-basierter Kommunikation* einzusetzen. Dies ist die Grundlage für die Deklaration von Steuerungsinformationen und Prozessvariablen, die zu überwachen bzw. zu optimieren sind.

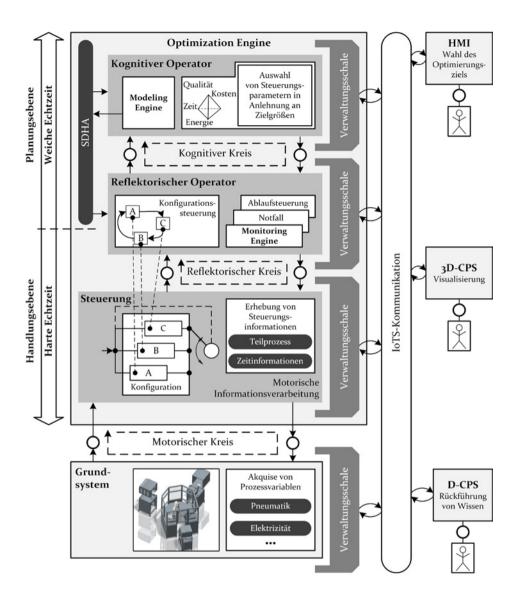


Bild 57: Architektur für die Selbstoptimierung technischer Systeme, eigene Erweiterung in Anlehnung an [111, 265, 333–339].

In diesem Kapitel wurde die Architektur eines Sozio-CPS für die modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung aufbauend auf dem Stand der Technik und Forschung sowie dem Handlungsbedarf definiert. Eingeführte Konzepte werden im folgenden Kapitel in drei unterschiedlichen Anwendungsfällen implementiert und der Lösungsansatz anhand der Ergebnisse evaluiert.

5 Validierung

Um das Konzept der Sozio-CPS in der modellbasierten Zustands- und Prozessüberwachung zu validieren, wurde der Systementwurf aus Kapitel 4 in insgesamt drei unterschiedlichen Szenarien anhand des eingeführten 4+2-Sichtenmodells implementiert. Hierzu gehört ein Prüfsystem für elektromechanische Baugruppen, ein mehrspindliges Bearbeitungszentrum im Bereich der spanenden Fertigung sowie eine Heißcrimpanlage als Anwendung im Elektromaschinenbau. Es stehen in Abhängigkeit der produktionstechnischen Anforderungen verschiedene Sichten und Facetten der Systemgestaltung im Vordergrund. Entsprechend wurden ausgewählte Teilsysteme konkret umgesetzt, andere Aspekte und notwendige graphische Benutzeroberflächen werden konzeptionell überprüft.

Tabelle 13 gibt einen Überblick über die Validierungsszenarien. Während der Lösungsspezifikation werden, solange es die Rahmenbedingungen zulassen, die Vorzugsstandards von RAMI4.0 eingesetzt. Technologisch basiert die konkrete Umsetzung wesentlich auf plattformübergreifenden Laufzeitumgebungen für parallelisierte Web- bzw. IoTS-Applikationen. Stellvertretend für eine Reihe vergleichbarer Lösungsansätze wurde die Plattform Node.js und die Programmiersprache Python ausgewählt, die sich auf Basis der Google V8 JS-Laufzeitumgebung, einer hohen Skalierbarkeit für verteilte Anwendungen sowie durch die Unterstützung von Kommunikationsstandards im Bereich der Informations- und Automatisierungstechnologie anbieten [298, 340, 341]. Gemäß der in Kapitel 4 definierten physischen Sicht und der Container-Methodik erfolgt die Verteilung der Teilsysteme mittels der Virtualisierungstechnologie Docker [318]. Die Anwendbarkeit von 3D-CPS wurde bereits in Kapitel 4.4 evaluiert und wird zugunsten der anderen Systeme zurückgestellt. Im Rahmen der Umsetzung wurde entlang von Refactoring-Zyklen schrittweise Quelltext von einer skriptbasierten Funktionssammlung in eine objektorientierte und damit wiederverwendbare Programmbibliothek überführt. Es wird eine Verteilung der Anwendungslogik vor dem Hintergrund der definierten Gesamtsystemarchitektur und des 4+2-Sichtenmodells auf unterschiedliche Dienste vorgenommen. Die konsequent browserbasierte Konzeption der HMI ist die Grundlage für eine Nutzung der entwickelten Artefakte auf einer Vielzahl von Endgeräten. Neben ausgewählten quantitativen Kriterien zur Beurteilung sind auch Systemeigenschaften von Bedeutung, die qualitativ beschrieben werden. Hierzu gehören Konfigurierbarkeit, Bedienbarkeit und Zuverlässigkeit. Das zur Nutzung notwendige Expertenwissen

5 Validierung

zur Modellbildung soll grundsätzlich nach dem Sozio-CPS-Konzept minimiert werden. Entwickelte Teilsysteme fügen sich nahtlos in verteilte, veränderliche Topologien und Systemstrukturen ein.

Tabelle 13: Beschreibung der Validierungsszenarien des Sozio-CPS

Validierungs- szenario	Kriterien	Beteiligte Systeme
Über- greifend	Anwendbarkeit von VS für die Datenakquise sowie des Plug and Monitor-Konzepts	VS
	Identifizierbarkeit von System- und Prozessmodellen unter Nutzung von Lernalgorithmen	Modeling Engine
	Ergonomie dreidimensionaler , referenzarchitektur- konformer Datenvisualisierung	3D-CPS
	Modellbasierte Zustands- und Prüfprozessüberwachung eines Prüfsystems für elektromechanische Baugruppen im Fall der Prozessvariablen elektrische Energie und Druckluft	Monitoring Engine
	Synthese einer Gesamtsystemarchitektur sowie Integration der Systeme in das Umfeld einer Smart Factory	Gesamt- system
Elektronik- produktion	Bewertung der Umsetzbarkeit von HMI für Sozio-CPS unter Nutzung von Webtechnologien	D-CPS
	Evaluierung der Verbesserung der Anlagendiagnose durch fortlaufende Integration von Benutzerwissen	D-CPS
	Erweiterbarkeit von Zustands- und Prozessüberwachung um Aspekte der modellbasierten Optimierung	Optimiza- tion Engine
Spanende Fertigung	Evaluierung der Eignung von VS zur Konfiguration eines mikro- elektromechanischen Messsystems zur Schwingungsanalyse	VS
	Modellbasierte Zustandsüberwachung von Vorschubachsen eines Bearbeitungszentrums mittels der Zustandsmerkmale bzw. Prozessvariablen Motordrehmoment, Umkehrspiel und Beschleunigung	Monitoring Engine
	Bewertung der Fertigungsprozessüberwachung mittels Beschleunigungsdaten unter Verzicht auf diskrete Steuerungsinformationen	Monitoring Engine
Elektro- maschinen- bau	Modellbasierte Zustandsüberwachung von Verschleiß- komponenten einer Heißcrimpanlage durch die Analyse von Energiedaten	Monitoring Engine
	Validierung der Fähigkeit zur Prädiktion der Produktqualität auf Grundlage von Temperaturdaten im Fügeprozess	Monitoring Engine
	Analyse der Nutzenpotentiale bei der Rückführung menschlichen Wissens der Anomalie- und Fehlerklassifikation	D-CPS

5.1 Wandlungsfähige Prüfsysteme für elektromechanische Baugruppen

Ein wichtiges Ziel im Kontext von Industrie 4.0 ist die Herstellung individualisierter Produkte bei Losgröße 1 zu Kostenstrukturen einer Großserienproduktion (vgl. Kapitel 1 und Kapitel 2). Im Bereich der Produktion elektromechanischer Baugruppen fordert dieses Paradigma Prüfsysteme, die effizient an veränderte Prüfaufgaben anpassbar sind. Die Flexibilisierung der Überwachung von Komponenten der Prüfprozesse ist in diesem Zusammenhang in gleicher Weise notwendig. Gegenstand des Validierungsszenarios ist daher die Entwicklung eines Sozio-CPS zur modellbasierten Komponentenzustands- und Prüfprozessüberwachung in Anlehnung an die Förderprojekte S-CPS und Optisches Positions- und Energiemesssystem (OPEM) [P6][23, 303].

Tabelle 14 stellt Ausgangssituation und Innovation des vorliegenden Anwendungsfalls gegenüber. Ausgewählte Inhalte, welche die Erprobung des Sozio-CPS-Konzepts in diesem Kontext beschreiben, wurden bereits im Vorfeld publiziert [P3, P4, P6-P8, P12]. Eine relevante Vorarbeit stellt das Konzept zur Abbildung von Pneumatik- und Energiemesssystemen mittels OPC UA dar [264, 303]. Weiterhin wurden Aspekte der Validierung in vom Autor betreuten studentischen Arbeiten vertieft [S1, S2, S4, S7-S12, S15, S16, S19, S22, S24, S25, S28].

Tabelle 14: Darstellung der Innovationen im vorliegenden Anwendungsfall

Ausgangssituation	Innovation
Zeitintensive, manuelle Rüstung von Prüf- systemen für die Baugruppenprüfung	Effiziente Prüfung von variantenreichen Prüfaufgaben bzw. Prüfskalen bis zur Prüfung elektromechanischer Baugruppen in Losgröße 1
Hohe Aufwände bei softwaretechnischer Konfiguration des Prüfsystems in Abhängigkeit der Prüfaufgaben	Beschreibung der Teilsysteme auf Basis semantischer Interoperabilitätsstandards als Grundlage für Plug and Produce- bzw. Plug and Monitor-Paradigmen
Manuelle Entwicklung von HMI, keine effiziente Weiternutzung von PLM-Daten	Automatisierte Erstellung einer dreidimensio- nalen, webbasierten Visualisierung unter Nutzung von RAMI4.o-Vorzugsstandards
Statische Überwachung von Teilsystemen des Prüfsystems	Überwachung und Optimierung des Prüfsystems anhand zur Laufzeit identifizierter Black Box-Modelle
Keine Verbesserung der Anlagendiagnose zur Laufzeit des Systems	Fortlaufende Rückführung von Benutzerwissen zur Verbesserung der Anlagendiagnose

5.1.1 Ausgangssituation, Voruntersuchung und Lösungsansatz

Im vorliegenden Prüfsystem ist durch den Austausch universeller Prüfadapter (Universal Contacting Modules - UCM) eine Anpassung an Produkt- und Prüfvarianten für elektromechanische Baugruppen nach dem Paradigma Plug and Produce möglich (vgl. Bild 58) [P3, P4][303]. In diesem Fall ist ein Prüfadapter UCM 1 mit einem optischen Inspektionstest ausgestattet, während ein zweiter Prüfadapter UCM 2 die Durchführung eines elektrischen Funktionstests der elektromechanischen Baugruppen erlaubt. Zusätzlich ist ein Heißfunktionstest über eine integrierte Temperiereinheit anwendbar. Eingesetzte Prüfadapter sind mittels einer prozessflexibel steuerbaren Robotereinheit bestückbar. Die Sequenz der Transitionen der Robotereinheit ist von den angeschlossenen Prüfadaptern sowie den Prüfspezifikationen der elektromechanischen Baugruppen abhängig. Energie- und Druckluftmesssysteme erlauben die Erfassung des elektrischen Verbrauchs sowie der Druckluftaufnahme der Robotereinheit und unterstützen damit die Forderung nach einer transparenten und ressourceneffizienten Produktion [P3, P4][264, 303]. Vordergründig bieten Robotereinheiten ein hohes Maß an Dynamik und eignen sich als komplexe Demonstrationsobjekte für die Evaluation der Funktionsfähigkeit einer Zustands- und Prozessüberwachung. Variable Funktions- und Verbrauchsparameter sowie eine Vielzahl an möglichen Zuständen stellen hier eine besondere Herausforderung für Systeme der Zustands- und Prozessüberwachung dar [P3, P4].

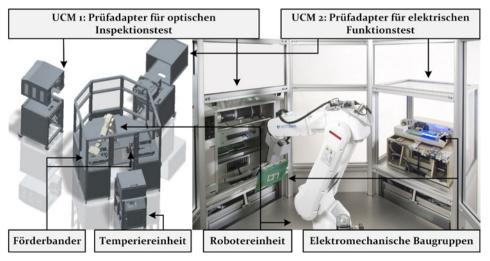


Bild 58: Vorliegendes Plug and Produce-Prüfsystems für elektromechanische Baugruppen (angelehnt an [P3][303, 342])

Im Fall des zu untersuchenden Prüfsystems wird die Umsetzung von sechs Anwendungsfällen angestrebt (vgl. Tabelle 15). Deren Umsetzung geschieht entlang der entwickelten Methodik für Sozio-CPS in der modellbasierten Zustands- und Prozessüberwachung nach Kapitel 4.

Tabelle 15: Zusammenfassung der Anwendungsfälle und Lösungsansätze im vorliegenden Validierungsszenario

Nr.	Anwendungsfall	Lösungsansatz	Beteiligte Systeme
I	Effiziente Konfiguration des Gesamtsystems: Nutzung von semanti- schen Interoperabilitäts- standards	Applizierung einer VS: Zusam- menführung von Steuerungs-, Druckluft- und Energiemesssyste- men in eine VS	VS
II	Detektion von Fehlern und Anomalien: Erkennen von Defekten der Roboter- einheit	Modellbasierte Zustandsüber- wachung der Verbrauchsgrößen als Prozessvariablen: Kontinuierlicher Vergleich eines identifizierten SDHA mit Beobach- tungen im Betrieb des Prüfsystems	VS, Modeling Engine, Monitoring Engine
III	Nichteinhaltung der defi- nierten Prüfprozessspezifi- kationen: Detektion ungültiger Bewegungs- abfolgen der Robotereinheit im Prüfprozess	Überwachung des diskreten Prüfsystemverhaltens unter Nutzung eines SDHA: Fortlaufende Überwachung der durchgeführten Transitionen, Prüf- prozessschritte sowie deren Zeit- vorgaben in Anlehnung an das Konzept des SDHA	VS, Monitoring Engine
IV	Prognose von Verschleiß- zuständen: Identifikation sich abzeichnender Trends in Prozess- variablen für eine vorausschauende Instandhaltung	Erweiterung eines SDHA um die Abbildung von Iterationen hybrider Zustände: Permanenter Vergleich der Iterationen von Pro- zessvariablen hybrider Anlagen- und Prozesszustände unter Verwendung eines SDHA	Monitoring Engine
V	Rückführung von Erfah- rungswissen zur Verbesse- rung der Prüfsystemdiag- nose: Verbesserung der Diagnosefähigkeiten in Anlehnung an das Sozio- CPS-Konzept	Ergänzung des Systemmodells sowie Annotation von Metadaten: Dynamische Erweite- rung eines Systemmodells durch die Annotation von Fehlerbeschrei- bungen und Handlungsanweisun- gen	D-CPS, 3D-CPS
VI	Optimierung der Ressourceneffizienz im Prüfbetrieb: Fortlaufende Optimierung des Prüf- systems für eine Verbes- serung der Prozess- effizienz	Realisierung eines optimierenden Prüfsystems: Variation und Validierung von Steuerungsparametern zur Opti- mierung der Ressourceneffizienz auf Grundlage identifizierter SDHA	Optimization Engine

5.1.2 Datenakquise und -visualisierung

Gemäß dem Integrationskonzept erfolgt die Zusammenführung der Steuerungsinformationen und der Prozessvariablen des Prüfsystems durch Applizierung einer VS. Das in Kapitel 2.5 eingeführte Messsystemkonzept nach *Kohl* trägt zu einer effizienten Implementierung bei [264]. Zwei interne Provider, die eine zyklische Datenabfrage über den gerätespezifischen und in diesem Anwendungsfall durch den Hersteller vorgegebenen Kommunikationsstandard ModbusTCP durchführen, dienen der Einbindung des Energie- und Flussmesssystems in das Informationsmodell [343].

Bewegungen der Robotereinheit zwischen ortsfesten Punkten gelten als diskrete Zustände des Roboters, werden über einen Provider mittels einer TCP/IP-basierten Socketverbindung akquiriert und stellen zu überwachende Teilprozesse im vorliegenden Anwendungsfall dar. OPC UA DA sowie OPC UA HA dienen der referenzarchitekurkonformen Bereitstellung von Steuerungsinformationen und Prozessvariablen einer anlageninternen SPS (vgl. Bild 59 bzw. Anwendungsfall I). Die Nutzung des FDI-basierten Informationsmodells für Zustands- und Prozessüberwachung garantiert ein hohes Maß an semantischer Interoperabilität (vgl. Kapitel 4.1). Abgebildet sind der physische Anlagenaufbau, die Prüfsystemkonfiguration und die Messsysteme (UCM, Conveyor, Module, Temperer, HandlingUnit, FlowMeasuringSystem, ElectricalEnergyMeasuringSystem) sowie die zur

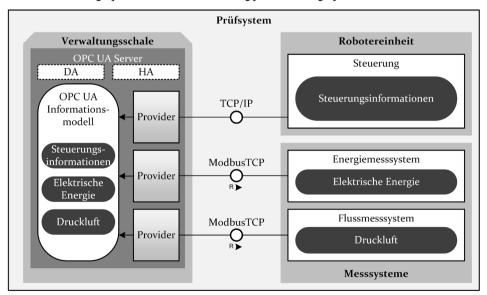


Bild 59: Aufbau einer VS für die Integration der Messsysteme und Steuerung der Robotereinheit (angelehnt an [P3, P6, P12])

Modellierung notwendigen Typklassen (*TestDeviceType*, *ConveyorDevice-Type*, *TempererDeviceType*, *ModuleDeviceType*, *HandlingDeviceType*, *Flow-MeasuringDeviceType*, *ElectricalEnergyMeasuringDeviceType*). Von besonderer Relevanz für die Zustands- und Prozessüberwachung sind in diesem Fall die Scheinleistung sowie der pneumatische Fluss der Robotereinheit (*ApparentPower bzw. Flow*). Ergänzend sind Seriennummer, Modell- und Herstellerbezeichnung enthalten (*SerialNumber, Model, Manufacturer*). Die Informationen über den Zustand der Robotereinheit werden im Knoten *TransitionState* gemäß *Damm et al.* bzw. *Kohl* persistiert (vgl. Bild 60) [160, 264]. Modelle für die Selbstkonfiguration, die durch die Modeling Engine generiert werden, sind zur Umsetzung des Plug and Monitor-Konzepts integrierbar (vgl. Bild 28) [P3, P4, P12][S2, S11, S24].

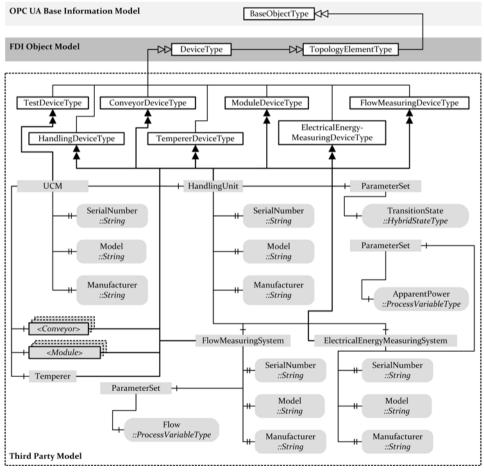


Bild 60: FDI-basiertes OPC UA-Informationsmodell für die Abbildung von Prüfsystemen im vorliegenden Anwendungsfall (angelehnt an [P₃, P₄, P₁₂])

5.1.3 Modellidentifikation

Mit Hilfe einer webbasierten Implementierung der Modeling Engine wird die Identifikation eines Prozessmodells entlang eines definierten Referenzprüfprozesses adressiert. Das Problem des zustands- bzw. teilprozessbezogenen Systemverhaltens wird durch die Prüfung kundenindividueller Baugruppen, deren Prüfspezifikation a priori nicht für eine manuelle Realisierung von Überwachungslogik bekannt ist, verstärkt.

Lösungsansatz für diese Aufgabenstellung ist die Interpretation eines Produkts als eine Abfolge von generischen Teilprozessen bzw. Transitionen auf Maschinenebene. Eine elektromechanische Baugruppe wird hier den Prüfadaptern sowie der Temperiereinheit sequentiell durch die Robotereinheit zugeführt und gemäß einer individuellen Prüfspezifikation geprüft. Transitionen der Robotereinheit zwischen ortsfesten Positionen fungieren als hybride Betriebszustände, die unter Normalbedingungen mit einem charakteristischem Zeitverhalten der Prozessvariablen einhergehen. Bild 61 visualisiert die definierten Bewegungen des Roboters innerhalb des Prüfsystems, während Bild 62 die Systemarchitektur der implementierten Modeling Engine zeigt.

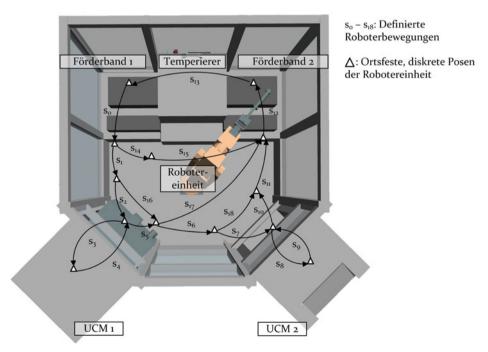


Bild 61: Mögliche Bewegungen der Robotereinheit zwischen ortsfesten Punkten innerhalb des Prüfsystems für elektromechanische Baugruppen

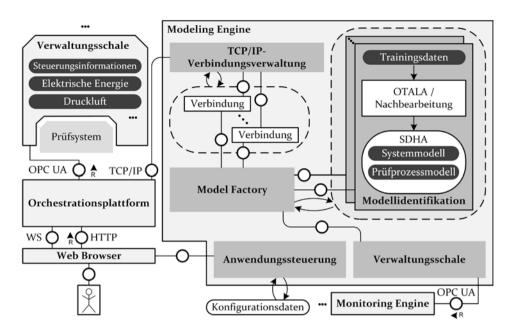


Bild 62: Entwicklungssicht der Modeling Engine zur Generierung von SDHA wandlungsfähiger Prüfsysteme (angelehnt an [P6-P8][S28])

Wesentlich wird aus Steuerungs-, Energie- und Druckluftdaten ein SDHA erzeugt und für die Nutzung in dezentralen Monitoring Engines bereitgestellt. Konkret wird im Agent *Modellidentifikation* der Modeling Engine der OTALA-Algorithmus passend zum selbstlernenden, adaptiven Charakter von CPPS gemäß Kapitel 2.2 zur Laufzeit des Prüfsystems umgesetzt. Dieser wird um eine Funktionalität zur Modellierung des kontinuierlichen Verhalten auf der Grundlage von VDMA 24582 ergänzt [P6][220]. Im ersten Schritt sind die Identifikation von Steuerungssignalvektoren bzw. Betriebszuständen sowie deren minimalen und maximalen Ausführungszeiten zur Abbildung des diskreten Prozessverhaltens thematisiert.

Die durchschnittliche Ausführungszeit eines Teilprozesses tp sowie deren Ober- und Untergrenzen t_{min} und t_{max} werden in Tabelle 16 zusammengefasst. Die Grenzen wurden zur Simulation zeitlicher Fehler und zur Validierung des Lösungsansatzes eng festgelegt. Zur Vervollständigung des SDHA ist die Generierung von Normaldaten zur Abbildung des kontinuierlichen Prozessverhaltens notwendig (vgl. Bild 63 bzw. Kapitel 4). Abschließend wird der SDHA in einem Teilmodell einer VS der Modeling Engine bzw. in der I4.0K des Prüfsystems zur weiteren Nutzung durch die Monitoring Engine bereitgestellt (vgl. Kapitel 4.1 sowie Bild 64). Bild 65 zeigt die HMI für die Modellidentifikation, die auf Grundlage der Node.js-Plattform sowie dem JS-Framework AngularJS umgesetzt ist [298, 300, 344].

5 Validierung

Tabelle 16: Analyse der Testdaten durch Darstellung von Teilprozessen, Durchlaufzeit pro Systemzustand sowie abgeleiteter Ober- und Untergrenzen für das zeitliche Verhalten (angelehnt an [P6-P8][S2, S25, S28])

Teilprozess	<i>tp</i> [<i>s</i>]	$t_{min}[s]$	$t_{max}[s]$
So	11,04	11,03	11,06
S_1	6,42	6,34	6,47
\mathbf{S}_2	7,60	7,53	7,65
\mathbf{s}_3	9,58	9,51	9,61
S_4	13,48	13,22	13,66
\mathbf{s}_5	7,46	7,37	7,53
S 6	12,06	11,90	12,23
\mathbf{s}_7	6,20	6,12	6,25
S ₈	10,17	10,15	10,19
\mathbf{s}_9	11,88	11,79	12,02
S_{10}	8,02	7,90	8,14
S ₁₁	8,67	8,58	8,81
S ₁₂	13,49	13,41	13,67
\mathbf{S}_{13}	17,45	17,34	17,73
S ₁₄	6,45	6,43	6,47
S ₁₅	11,34	11,31	11,35
S ₁₆	8,66	8,65	8,67
S ₁₇	15,62	15,52	15,72
S ₁₈	9,91	9,81	10,08

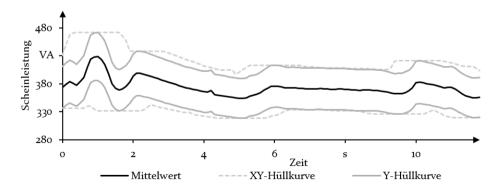


Bild 63: Erzeugung von Warn- und Eingriffsgrenzen für die Überwachung der Prozessvariablen am Beispiel eines Lastprofils von Zustand s_9 (angelehnt an [P6-P8][S2, S25, S28])

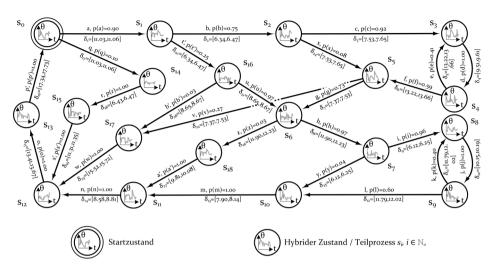


Bild 64: Identifizierter SDHA des Baugruppenprüfprozesses der Robotereinheit (angelehnt an [P6-P8][S2, S25, S28])

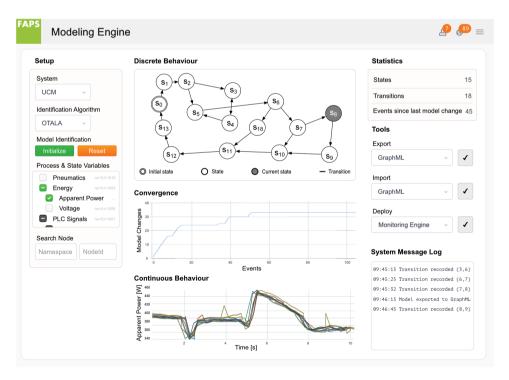


Bild 65: Entwurf einer graphischen Benutzeroberfläche für die Modellidentifikation

Die Kommunikation zwischen Modeling Engine und browserbasierter Benutzeroberfläche erfolgt mittels WS. Neben Eingabeelementen zur Steuerung der Anwendung und Ausgabeelementen zur Anomaliedarstellung ist die Visualisierung des generierten SDHA essentiell.

Das Konvergenzverhalten ist ebenfalls Teil der Visualisierung. Für die Überführung der anwendungsinternen Datenstruktur des SDHA in das GraphML-Datenformat wurde eine Programmbibliothek sowie ein GraphML-Schema realisiert [304].

5.1.4 Komponentenzustands- und Prüfprozessüberwachung

Basierend auf der Modellidentifikation ist gemäß der Sozio-CPS-Architektur die Realisierung einer konfigurierbaren, modellbasierten Zustands- und Prozessüberwachung in Form einer Monitoring Engine angestrebt (vgl. Anwendungsfall II/III). Dies schließt insbesondere die Implementierung von *CMFB* ein, welche die Anwendungslogik für die Lösung spezifischer Anwendungsfälle II-VI beinhalten. Im Fall eines ungültigen Zustandswechsels erfolgt die Annahme einer Anomalie. Mit dem vorgestellten Verfahren zur Abstraktion des Prozessverhaltens ist eine Grundlage für nachgelagerte Diagnose-, Wartungs- und Optimierungsprozesse gegeben. Eine resultierende Menge unterscheidbarer Zustände dient schließlich zur Identifikation eines hierarchischen Modells, welches das Normalverhalten eines Prüfprozesses abstrahiert. Aufbauebenen folgen dem Produkt-Prozess-Ressource-Modell, während eine Ebene dabei mehrere Zustände umfasst. Innerhalb einer Ebene ist jeweils nur ein Zustand pro Ebene aktiv (vgl. Bild 66) [P15][S4][179, 345].

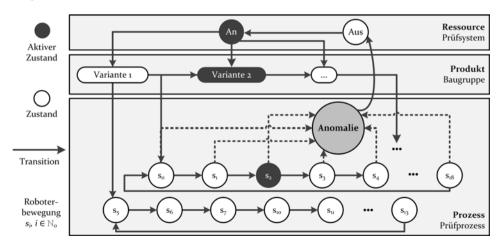


Bild 66: Darstellung von Prüfsystem, Baugruppe und Prüfprozess in Anlehnung an das Produkt-Prozess-Ressource-Modell (angelehnt an [P15][S4][179, 345])

Bild 67 zeigt die Architektur der Monitoring Engine, die nachfolgend erläutert wird. Für das Einlesen der *Prüfspezifikationen* per RFID sowie der Akquise von *Steuerungsinformationen*, *Energie*- und *Druckluftdaten* der *I4.0K bzw. VS* (1)(2) stehen entsprechende *Eingangsschnittstellen* (3) bzw. die *Eingangsblöcke* (4) zur Verfügung. Deren Konfiguration bzw. die Erkennung zustandsrelevanter Prozessvariablen und Steuerungsinformationen geschieht nach dem Plug and Monitor-Konzept in Anlehnung an Informationsmodell oder *Verwaltungsschnittstelle* (5) und *Konfigurationsverwaltung* bzw. *-daten* (6)(7).

In diesem Validierungsszenario wird die Anwendungslogik der Zustandsund Prozessüberwachung auf Basis von vier *CMFB* abgebildet. Eine Überwachung der Systemkomponenten bzw. der kontinuierlichen Prozessvariablen gemäß Anwendungsfall II erfolgt mit dem *CMFB Zustandsüberwachung* (8). *CMFB Prozessüberwachung* (9) setzt die Funktionalitäten für die Überwachung der Korrektheit und Effizienz des Baugruppenprüfprozesses gemäß Anwendungsfall III um. In diesem Fall wird die Existenz von Transitionen zwischen den diskreten Zuständen sowie die Einhaltung zeitlicher Unter- und Obergrenzen überwacht. Grundlage sind SDHA, die entweder aus dem Informationsmodell auf Maschinenebene oder der Modeling Engine entnommen werden. Der *CMFB Vorausschauende Instandhaltung* (10) trägt Anwendungsfall IV Rechnung.

Aus der Analyse durchgeführter Iterationen der Teilprozesse können Prozessvariablen verglichen und das Über- bzw. Unterschreiten von Warnund Eingriffsgrenzen antizipiert werden. *Diagnose* (11) fasst Komponentenzustände und den Status des Prüfprozesses zusammen. Über den *Datenbus* (12) werden detektierte Anomalien der *CMFB* für weitere *CMFB*, *Ausgangsblöcke* (13) und *Ausgangsschnittstellen* (14) modulintern angeboten. Eine VS beinhaltet einen OPC UA Server, der detektierte *Anomalien*, *Fehler* und *Instandhaltungszeitpunkte* standardkonform über OPC UA bereitstellt. Aus Komplexitätsgründen nicht eingezeichnet sind ein Webserver für die Bereitstellung der Ressourcen der Browseranwendung sowie ein WS-Endpunkt, der die zusammengeführten Prozessvariablen, Zustandsinformationen und SDHA zur Anbindung von Anwendungssystemen offeriert.

Eine umfassende Validierung der Komponentenzustands- und Prüfprozessüberwachung ist im Rahmen von dissertationsbezogenen studentischen Arbeiten erfolgt und ist bereits veröffentlicht [P3, P4, P6-P8] [S1, S2, S4, S7, S11, S12, S15, S25, S28].

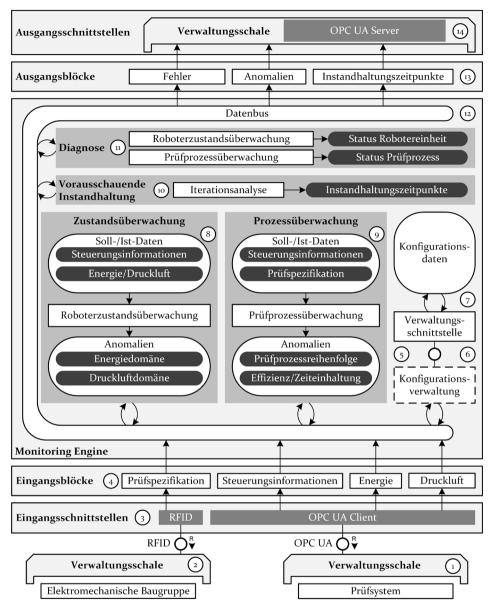


Bild 67: Entwicklungssicht der Monitoring Engine für die modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung wandlungsfähiger Prüfsysteme (angelehnt an [P6])

Bild 68 zeigt den Entwurf einer browserbasierten HMI, die technologisch analog zur Modeling Engine umgesetzt wurde. Neben einer Steuerung der Anwendung ist unter anderem die Visualisierung und Auswahl von SDHA möglich. Das diskrete Verhalten wird im Abschnitt *State* dargestellt, während ergänzend die zusammenfassende Darstellung der weiteren Systemkomponenten erfolgt (*UCM 1, UCM 2, Conveyor 1*). Weiterhin ist die Visualisierung kontinuierlicher Prozessvariablen möglich, die neben den reinen Signalverläufen zusätzlich auch Zustandsübergänge sowie Warn- und Eingriffsgrenzen darstellen. *Platform Metrics* zeigt Informationen über die Auslastung von Zentraleinheit und Speicher der Laufzeitumgebung des Systems, während *Conditions* und *Notifications* Zustände und Benachrichtigungen weiterer Systemkomponenten bereitstellen.

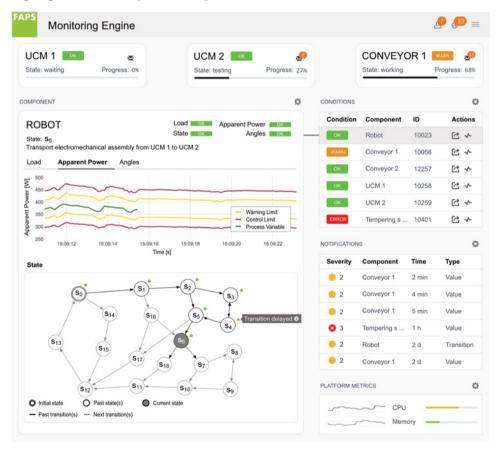


Bild 68: Entwurf einer graphischen Benutzeroberfläche für eine modellbasierte Zustandsund Prozessüberwachung des Prüfsystems

Für die Datenvisualisierung der Anomalien dient eine ergänzende Listenansicht, die eine Filterung der Ereignisse nach auslösendem System (System), Komponente (Component), diskretem Zustand (State), Prozessvariable (Process Variable) und Zeitraum (Time Range) erlaubt (vgl. Bild 69). Einträge enthalten weiterhin Identifizierung (ID), Priorität (Severity), Zeitpunkt (Time/Date), Kategorie (Category), Beschreibung (Description) sowie eine Verknüpfung zu kontextrelevanten Informationen (Actions). Die Filterung erfolgt durch parametrisierte Aufrufe der Browseranwendung nach dem REST-Paradigma [346]. Anomalien werden durch WS-Verbindungen zur HMI weitergegeben. Ein Neuladen zur Aktualisierung der Visualisierung ist nicht notwendig.

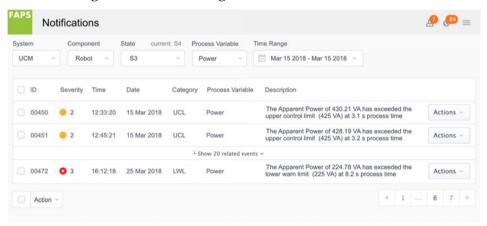


Bild 69: Entwurf einer graphischen Benutzeroberfläche für die Visualisierung und Filterung der detektierten Anomalien

5.1.5 Vorausschauende Instandhaltung

Gemäß Anwendungsfall IV ist eine Assistenzfunktion zur Detektion sich abzeichnender Trends in Prozessvariablen notwendig, die ein rechtzeitiges Eingreifen menschlicher Bediener erlauben. Ausgangspunkt hierfür ist die Sensorisierung von Komponenten zur kontinuierlichen Erhebung zustands- und prozessrelevanter Daten und Informationen gemäß Kapitel 2.1 und Kapitel 2.2. Im Fall von Robotereinheiten besteht ein Zusammenhang zwischen dem Zustand des Antriebssystems und Veränderungen in den teilprozessspezifischen Lastprofilen [P3][S4][303].

Die theoretische Grundlage stellt die Methode zur Prognose von Ausfallzeitpunkten auf Basis beobachteter Zustands- bzw. Diagnosemerkmale sowie Regressionsmethoden dar (vgl. Kapitel 4.3.1). Entlang der Prüfung individueller, elektromechanischer Baugruppen in Losgröße 1 werden Teilprozessschritte im Prüfprozess kombiniert und in Iterationen wiederholt.

Die Analyse der Teilprozessschritte stellt Vergleichbarkeit für das Konzept einer vorausschauenden Instandhaltung her. Bild 70 verdeutlicht die entwickelte Methodik im Kontext dieses Validierungsszenarios. Diese Funktionalität wurde im *CMFB Vorausschauende Instandhaltung* (10) implementiert. Bild 71 zeigt eine HMI, in der Filteroptionen die Selektion eines Systems (*System*), einer Komponente (*Component*), eines hybriden Zustands bzw. Teilprozesses (*State*) und einer Prozessvariable (*Process Variable*) für einen iterationsbezogenen Vergleich von Prozessvariablen (*Iterations*) erlauben. Entlang der Iterationen ist ein Trend erkennbar, der auf Grundlage einer konventionell signalbasierten Analyse für den Menschen als Benutzer kaum identifizierbar ist. Die Zeitreihen der Prozessvariablen sind damit vom individuellen Prüfprogramm bereinigt.

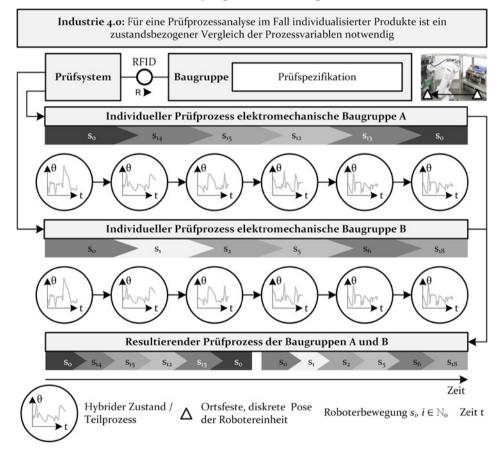


Bild 70: Methodik für vorausschauende Instandhaltung auf Basis einer modellbasierten Zustands- und Prozessüberwachung (angelehnt an [P3, P4, P6-P8])



Bild 71: Entwurf einer graphischen Benutzeroberfläche für die iterationsbezogene Analyse eines Teilprozesses der Robotereinheit sowie Regression zur Ermittlung von Instandhaltungszeitpunkten (angelehnt an [P6][S2, S4, S12, S19])

5.1.6 Ergonomie des Bedienkonzepts

Eine rollenspezifische Datenvisualisierung realisiert ein *D-CPS* (vgl. Anwendungsfall V) [298]. Bild 72 zeigt eine browserbasierte HMI für das Erstellen und Editieren von Handlungsanweisungen. Enthalten sind Anlagenstandort, System, Komponente, Fehleridentifikation, Fehlerbeschreibung, Austauschzeitpunkt, benötigtes Material, benötigtes Werkzeug, Maßnahmen zur Fehlerbehebung sowie ergänzende multimediale Inhalte wie Dokumente oder Videos, die durch den menschlichen Benutzer gepflegt werden können. Technologisch bilden das clientseitige JS-Framework AngularJS, die JS-Bibliothek Socket.IO und die Node.js-Laufzeitumgebung einen Ausgangspunkt für die Implementierung [298, 299, 329, 344].

5.1.7 Prüfprozessoptimierung

Für die vollständige Umsetzung des definierten Konzepts der Sozio-CPS ist eine zustandsbezogene Optimierung unter veränderlichen Steuerungsparametern notwendig. Im vorliegenden Anwendungsfall ist die Verbesserung der Ressourceneffizienz des Prüfsystems auf Basis einer dynamischen Steuerungsstrategie mit den Systemen VS, Modeling Engine und Optimization Engine angestrebt (vgl. Bild 73). Durch die Variation der Geschwindigkeit als Betriebsparameter entlang eines durch den Nutzer vorgegebenen Wertebereichs kann eine Änderung der Prüfgeschwindigkeit und damit des Lastgangs erreicht werden. Im vorliegenden Anwendungsfall wurde die Verfahrgeschwindigkeit im Zustand s₁₁ variiert.

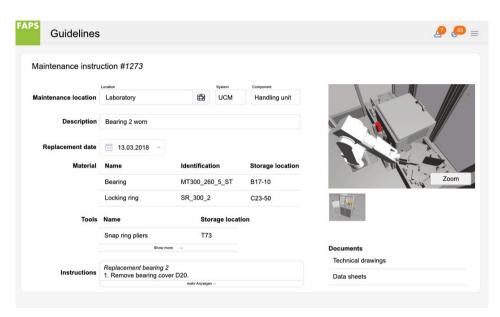


Bild 72: Entwurf einer graphischen Benutzeroberfläche für die Erstellung und Editierung von Handlungsanweisungen (angelehnt an [P6])

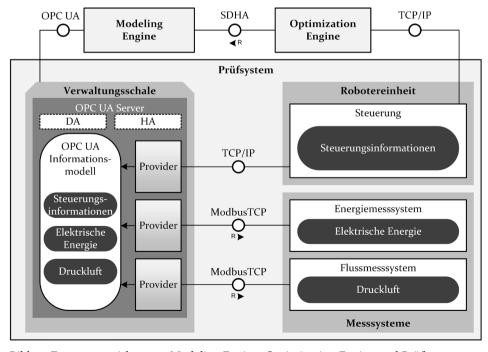


Bild 73: Zusammenwirken von Modeling Engine, Optimization Engine und Prüfsystem

5 Validierung

Tabelle 17 quantifiziert die Relation von Verfahrgeschwindigkeit, Verfahrzeit und elektrischem Energieverbrauch im hybriden Zustand. Ein linearer Zusammenhang ist nicht gegeben, da Umsetzzeitpunkte der Robotereinheit in diesem Teilprozess zeitlich nicht variierbar sind und damit eine konstante Zeitdauer besitzen. Bild 74 zeigt die mit einer Modeling Engine aufgezeichnete Veränderung des Lastprofils der Scheinleistung.

Tabelle 17: Einfluss der Verfahrgeschwindigkeit auf Verfahrzeit und Energieverbrauch im Zustand $s_{\rm n}$

Verfahrgeschwindigkeit [%]	Verfahrzeit [s]	Energieverbrauch [Ws]
100	8,67	3856
95	9,13	3580
90	9,68	3418

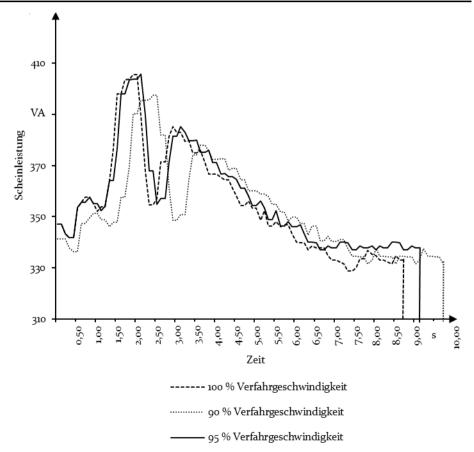


Bild 74: Variation der Verfahrgeschwindigkeit zur schrittweisen Optimierung von Prüfzeit bzw. Energieeffizienz

5.1.8 Synthese einer Gesamtsystemarchitektur

Zusammenfassend wird eine Gesamtsystemarchitektur synthetisiert. Neben den bisher definierten Systemen (I4.0K/VS – Kapitel 4.1, Modeling Engine – Kapitel 4.2, Monitoring Engine – Kapitel 4.3, 3D-CPS – Kapitel 4.4, D-CPS – Kapitel 4.5, Optimization Engine – Kapitel 4.6) sind auch existierende proprietäre Systeme zur Zustands- und Prozessüberwachung Teil des Gesamtkonzepts. Wertschöpfungsübergreifende Vernetzung erfolgt auf der Grundlage eines Gateways, das externe Stakeholder wie Dienstleister oder Fabrikausrüster einbindet [317]. Hervorzuheben ist in diesem Fall ein Redaktions- bzw. Planungsteam, das die Überarbeitung und Analyse der im Handlungsfall eingepflegten Inhalte in einer Instandhaltungsplanung vornimmt. Im begleitenden Förderprojekt S-CPS wurden neben weiteren Funktionalitäten automatisierte Allokationsmechanismen von Instandhaltungsaufgaben auf Stakeholder umgesetzt [20, 23]. Übergreifend steht eine Schnittstelle zu einem MES sowie ein OPC UA-spezifischer Global Directory Service zur Verfügung [160]. Bild 75 fasst die Architektur zusammen.

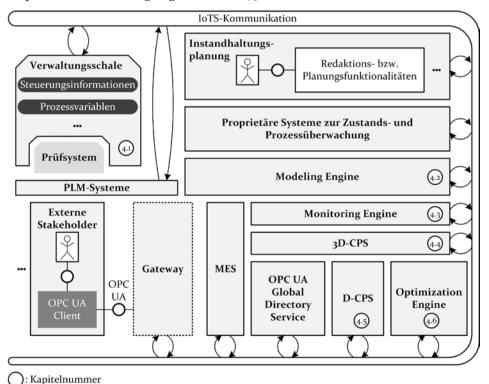


Bild 75: Synthese eines Gesamtsystems im Kontext einer Smart Factory

5.1.9 Ergebnisdiskussion

Die Zielsetzung im vorliegenden Validierungsszenario eines Prüfsystems bestand darin, die Einsetzbarkeit eines Sozio-CPS zur effizienten Betriebsführung, Zustands- und Prozessüberwachung unter Beachtung von Aspekten der Wandlungsfähigkeit zu bewerten. Nach Analyse der Ausgangssituation werden sechs Anwendungsfälle zusammengefasst und Assistenzfunktionen entwickelt, um dem Mensch als Instandhalter zielführende Einsichten in das Prüfsystem als vielschichtiges CPPS zu bieten.

Mittels OPC UA werden erfasste Steuerungsinformationen und Prozessvariablen bedarfsorientiert in ein gemeinsames standardisiertes Informationsmodell nach dem Konzept der VS integriert. Eine Identifikation von hybriden Modellen der integrierten Robotereinheit stützt sich auf die Umsetzung der Modeling Engine und des OTALA-Algorithmus, der um eine Funktionalität zur Bestimmung von Transitionswahrscheinlichkeiten und Regressionsmodellen für die Abbildung von kontinuierlichen Prozessvariablen erweitert wurde. Anwendbarkeit auf reale Produktionssysteme ist nach den Prinzipien des dienst- bzw. datenflussorientierten Softwareentwurfs nachgewiesen. Die Monitoring Engine bietet auf Grundlage der Iterationsanalyse die Chance des Vergleichs durchgeführter Teilprozesse. Hiermit wird eine prospektive Aussagefähigkeit über bevorstehende Fehler erreicht und eine vorausschauende Instandhaltungsstrategie ermöglicht. Die Einführung von zeitlich erweiterten Hüllkurven erlaubt eine Verbesserung der Klassifikation. Ausgehend von detektierten Anomalien der Monitoring Engine wird systematisches Wissensmanagement durch sukzessives Annotieren von Metadaten betrieben. Der Mensch als Instandhalter formalisiert durch das Anlegen und Editieren von Fehlerbeschreibungen und Handlungsanweisungen sein Wissen und verbessert damit Instandhaltungsprozesse und Überwachungsfähigkeiten zugrundeliegender CPS. Mit einem browserbasierten Assistenzsystem wird ein wichtiger Beitrag für ein praxisgerechtes Sozio-CPS realisiert, das sich nahtlos in das Umfeld einer Smart Factory einfügt.

Zusammenfassend bietet die vorgestellte Implementierung wesentliche Kennzeichen eines Sozio-CPS. Eine integrative Vernetzung von System-komponenten, ein hohes Maß an semantischer Interoperabilität, Selbstorganisationseigenschaften durch die konsequente Nutzung von RAMI4.o-Technologien, Plug and Produce bzw. Plug and Monitor-Mechanismen, Modellbildung von Komponenten und Prozessen zur Selbstüberwachung sowie eine Interaktion von Teilsystemen unter Verwendung von SOA, die Vorgänge der Rekonfiguration unterstützen, sind nur die wichtigsten

Eigenschaften und Fähigkeiten des Gesamtsystems. Abschließend wird ein erster Lösungsansatz zur Selbstoptimierung nach dem Prinzip intelligenter technischer Systeme evaluiert. Die Variation von Parametern zur Beeinflussung und Optimierung wählbarer Zielgrößen, wie Zeit, Qualität, Energie und Kosten sind zur Laufzeit des Systems im Zusammenspiel mit weiteren Systemen veränderbar. Damit kann bei der Beplanung des Prüfsystems entschieden werden, ob ein Betrieb in hoher Taktrate oder ein energieeffizienterer Betrieb mit längeren Taktzeiten sinnvoll ist.

5.2 Mehrspindlige Bearbeitungszentren

Die Kombination von Fräs- und Drehbearbeitung sowie hohe Verfahr- und Bearbeitungsgeschwindigkeiten verknüpft mit gesteigerter Energie- und Ressourceneffizienz stellen gehobene Anforderungen an die Verfügbarkeit und Ausfallsicherheit von Bearbeitungszentren [190, 347, 348]. Zur Validierung der in Kapitel 4 konzipierten Methodik ist die Implementierung eines Gesamtsystems zur Zustandsüberwachung von Kugelgewindetrieben (KGT) als wesentliche Verschleißkomponente in Bearbeitungszentren Gegenstand dieses Kapitels. Zusätzlich wird in diesem Anwendungsfall eine Funktionalität zur Überwachung spanender Fertigungsprozesse eingeführt. Teilergebnisse der Untersuchung wurden in vom Autor betreuten, dissertationsbezogenen studentischen Arbeiten erprobt. Im Rahmen von Veröffentlichungen wurden diese Ergebnisse von der Fachwelt geprüft [P3, P6-P8, P12, P14, P15][S2, S4-S8, S10-S12, S15-S18, S20, S22-S26, S28-S30].

5.2.1 Ausgangssituation und Voruntersuchung

KGT sind Maschinenelemente, die zur Erzeugung einer Vorschubbewegung für Transport- und Positionieraufgaben eingesetzt werden und stellen ein wesentliches Element in Bearbeitungszentren dar [190, 349, 350]. Aufbau, Entwurfsparadigmen, Verschleißmechanismen sowie charakteristische Schadensformen sind umfassend erforscht [190, 349–386]. Eine Möglichkeit zur Zustands- und Prozessüberwachung basiert auf der Analyse von Beschleunigungsdaten [190, 387, 388]. Begleitend untersucht *Rudolf* den Einsatz digitaler Antriebssignale im Bereich der Zustands- und Prozessüberwachung [369]. Von Bedeutung im vorliegenden Anwendungsfall ist weiterhin die Überwachung auf Basis einer Umkehrspielmessung, die entscheidend für Positionsregelung bzw. Bearbeitungspräzision ist [190, 389]. *Plapper* und *Weck* definieren eine modulare Architektur für Systeme der Zustandsüberwachung von Vorschubachsen unter Nutzung steuerungsinterner Signale [389]. *Walther* erforscht ebenfalls Lösungsansätze für eine Systemarchitektur, bietet eine zusammenfassende Darstellung des

5 Validierung

Stands der Technik und Wissenschaft im Bereich der antriebsbasierten Diagnose von Vorschubachsen mit KGT und führt den Indikator der Schwingungsenergie in diesem Zusammenhang ein [388].

In diesem Kapitel steht dementgegen die Definition eines ganzheitlichen Sozio-CPS im Vordergrund, das Aspekte semantischer Interoperabilität, Komplexitätsreduktion sowie Modellidentifikation zur Schaffung von Transparenz fokussiert. Im vorliegenden Validierungsszenario beinhalten die betrachteten Bearbeitungszentren zwei getrennte Bearbeitungskanäle. Ein Bearbeitungskanal verfügt über eine Hauptspindel, die über jeweils drei unterschiedliche, orthogonal angeordnete elektromechanische Vorschubachsen (X/Y/Z bzw. XX/YY/ZZ) positioniert wird. Jede der Vorschubachsen nutzt zur Positionierung KGT, die eine Verschleißkomponente darstellen [190, 347, 348, 384]. Durch Analyse verschlissener KGT sind die Verschleißmechanismen *Ermüdung* bzw. *Oberflächenzerrüttung* nachweisbar [349, 350, 370–372, 378]. Als Folge sind an allen untersuchten KGT Beschädigungen in Form von Pittings vorhanden, die eine Einhaltung von Toleranzvorgaben erschweren (vgl. Bild 76) [190, 389].

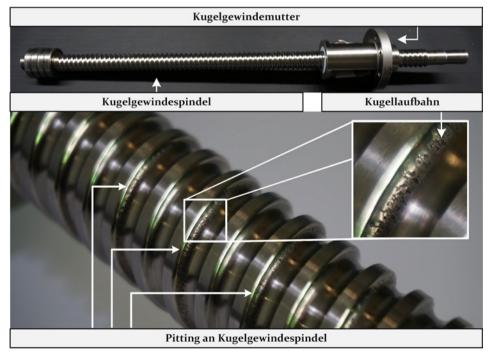


Bild 76: Kugelgewindetrieb sowie Schadensform des Pittings (angelehnt an [P14, P15] [S18, S23, S26])

5.2.2 Lösungsansatz

Basierend auf der Voruntersuchung stellen in diesem Anwendungsfall Motordrehmoment, Umkehrspiel (US) und Beschleunigung Prozessvariablen dar, die als Grundlage für eine Zustandsüberwachung der KGT und der Überwachung des Fertigungsprozesses nutzbar sind. Einleitend wird die Akquise und Evaluierung der steuerungsinternen Signale Motordrehmoment und Umkehrspiel untersucht. Angestrebt ist die Antizipation von Ausfallzeitpunkten unter Nutzung spezieller Steuerungsprogramme. Für die Durchführung der Versuchsreihe wird ein Bearbeitungszentrum mit verschlissenen sowie unverschlissenen KGT untersucht. Darüber hinaus erfolgt die Überwachung des Fertigungsprozesses zur Laufzeit auf Basis der Prozessvariable Beschleunigung. Verbaute KGT werden mittels dienstbasierter Beschleunigungsmesssysteme sensorisiert und durch die Applikation einer VS zu I4.0K qualifiziert. Da ökonomische Aspekte insbesondere bei Nachrüstlösungen von Bedeutung sind, wird die Einsetzbarkeit kostengünstiger mikroelektromechanischer Systeme (MEMS) evaluiert.

Auch wenn Lösungsansätze wie die VS für die Realisierung standardisierter Kommunikation und semantischer Interoperabilität im Stand der Forschung verfügbar sind, stellen proprietäre bzw. fehlende informationstechnische Schnittstellen bei Bestandsanlagen ein Hindernis dar (vgl. Kapitel 2.6). Die Lernalgorithmen gemäß Kapitel 2.2.2 sind, bedingt durch die Nutzung eines geschlossenen Informations- und Automatisierungssystems, nicht einsetzbar. Fokussiert wird der Einsatz signal- und modellbasierter Überwachung. Die nutzerwahrnehmbare Komplexität wird reduziert und der Mensch als Bediener nach dem Gedanken der Sozio-CPS bei der Überwachung, Betriebsführung und Instandhaltung entlastet. Übergreifend dient ein Systementwurf entsprechend der in Kapitel 4 definierten Gesamtsystemarchitektur der Umsetzung und Ergebnisdiskussion [S1, S6, S8, S15, S20, S23-S25, S30].

5.2.3 Datenakquise und -visualisierung

Gemeinsam mit den Motorstromsignalen werden die Positionsdaten der indirekten und direkten Positionsmesssysteme mittels des industriellen Kommunikationsstandards Process Field Bus (PROFIBUS) an Automatisierungssysteme übermittelt. Im Anschluss erfolgt eine Vorverarbeitung von elektrischen Energiedaten zu Motordrehmomentwerten in einer SPS. Die Realisierung der Testläufe erfordert die Implementierung spezieller Steuerungsprogramme bzw. Organisationsbausteine, die in einer rechnergestützten numerischen Steuerung umgesetzt werden. Bild 77 zeigt die

Implementierung einer VS für die Erhebung von Energie-, Motordrehmoment- und Positionsdaten in Anlehnung an Kapitel 2.1.4. Hierbei werden die abgefragten Messdaten mittels des in Kapitel 4.1 eingeführten Provider-Konzepts in die zugehörigen Datenpunkte des Informationsmodells eines OPC UA-Servers integriert.

Für die Akquise, Verarbeitung und Validierung der Beschleunigungsdaten wurde ein Messsystem auf Basis eines Einplatinencomputers in Anlehnung an den Stand der Forschung entwickelt, das parallel zum bestehenden Automatisierungssystem der Bearbeitungszentren der Datenakquise dient [390, 391]. Wesentlicher Bestandteil ist ein mikroelektromechanisches, triaxiales Beschleunigungsmesssystem.

Im Rahmen der Messkampagne bzw. des Produktionsprozesses wird unter Nutzung einer Abtastrate von 1600 Hz die Beschleunigung des KGT erhoben und mittels des Kommunikationsstandards Serial Peripheral Bus (SPI) in die VS übertragen (vgl. Bild 78).

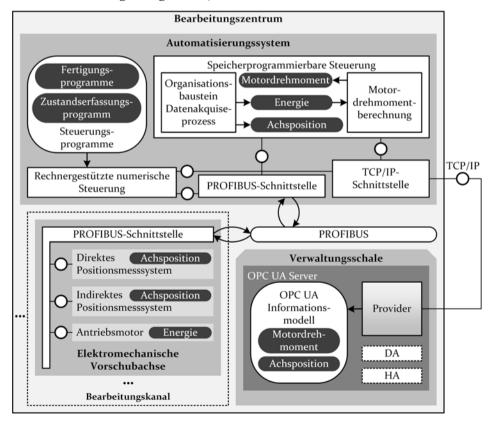


Bild 77: Aufbau einer VS für die Bereitstellung von Steuerungsinformationen eines Bearbeitungszentrums



Bild 78: Montage eines Beschleunigungssensors auf einer Kugelgewindemutter im Bearbeitungszentrum (angelehnt an [S6, S24, S26][390, 391])

Für die Bereitstellung der Beschleunigungsdaten ist die Umsetzung einer weiteren VS notwendig. Ein Messsystem verwaltet jeweils einen Bearbeitungskanal mit insgesamt drei KGT bzw. Sensoren, deren Messdaten mittels eines OPC UA-Servers in Anlehnung an die Anlagentopologie zur Verfügung gestellt werden. In diesem Anwendungsfall findet eine bidirektionale Kommunikation zwischen Sensorik und VS statt, da die Realisierung von Funktionen zur Konfiguration und Kalibrierung der Sensorik notwendig ist (vgl. Bild 79) [P14, P15][S6, S20, S24, S26]. Ergänzend visualisiert Bild 80 die Implementierung eines FDI-konformen OPC UA-Informationsmodells für die Unterstützung semantischer Interoperabilität, das nachfolgend erläutert wird. Ein Bearbeitungszentrum (MachiningCenter) ist eine Instanz des Typs MachiningCenterDeviceType. Erneut erfolgt die Beschreibung mit den Attributen Manufacturer, das die Zeichenkette für die Herstellerbezeichnung beinhaltet und Model, das die Modellbezeichnung einschließt. In Anlehnung an die physische Anlagentopologie der Bearbeitungsräume (Channel) und der KGT ist das Informationsmodell weiter

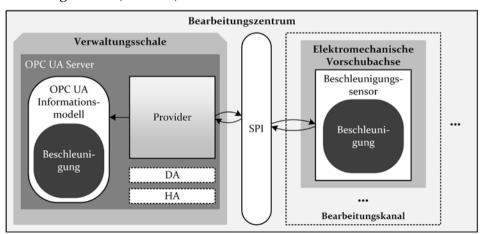


Bild 79: Aufbau einer VS für die Bereitstellung von Beschleunigungsdaten (angelehnt an [S6, S24])

gegliedert. Genutzt werden Instanzen des Typs KGT (BallScrewDrive-DeviceType), der vom Typ Gerät (DeviceType) abgeleitet ist. Eine Charakterisierung des Beschleunigungssensors (VibrationSensorDeviceType) erfolgt zum besseren Verständnis in einem separaten Informationsmodell, welches in Bild 81 dargestellt ist. Die FDI-spezifischen Attribute Manufacturer und Model beinhalten ebenfalls Hersteller- und Modellbezeichnung. Ein ParameterSet enthält schließlich die gemessenen Beschleunigungsdaten in drei räumlichen Orientierungen (VibrationX, VibrationY und VibrationZ). Instanziiert wird ein Sensortyp (VibrationSensorDeviceType), welcher vom DeviceType abgeleitet ist. Zusätzlich verfügt der Beschleunigungssensor über ein ActionSet, in welchem Methoden für die Parametrisierung des Messsystems implementiert sind. Methoden zur Variation von Abtastfrequenz (SetSamplingFrequency), Messbereich (SetRange) und Zwischenspeichergröße (SetWatermarkHeight) erleichtern die Rekonfiguration des Messsystems zur Laufzeit. Während die Methode StartLogging einen Speichervorgang zu Entwicklungszwecken realisiert, erfolgt eine Kalibration der Messsysteme auf Basis der Methode StartCalibration. Der natürlich wirkende Anteil der Erdbeschleunigung wird als Korrekturfaktor und im Informationsmodell des OPC UA-Servers persistiert (Correction-FactorVibrationX, CorrectionFactorVibrationY, CorrectionFactorVibrationZ). Zusammenfassend zeigt Bild 82 das an einem KGT detektierte Beschleunigungssignal sowie ein Spektrogramm entlang der Fertigung eines Produkts, das im Rahmen von betreuten studentischen Arbeiten erstellt wurde. Tauglichkeit und Funktion implementierter I4.0K für die Datenakquise im vorliegenden Validierungsszenario können somit bestätigt werden [P14, P15][S5, S6, S20, S24, S26][289, 392-394].

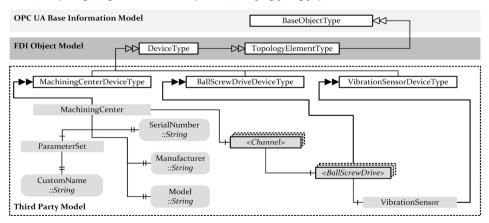


Bild 80: FDI-basiertes OPC UA-Informationsmodell für die Abbildung von Bearbeitungszentren im vorliegenden Anwendungsfall

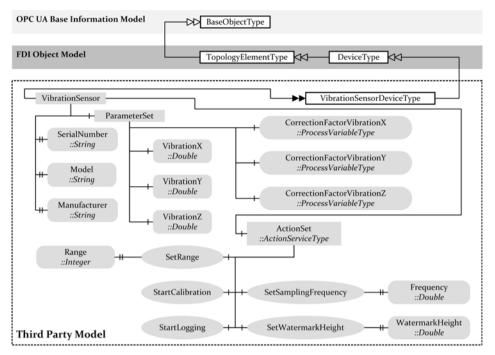


Bild 81: FDI-basiertes OPC UA-Informationsmodell für die Abbildung von Beschleunigungssensoren im vorliegenden Anwendungsfall

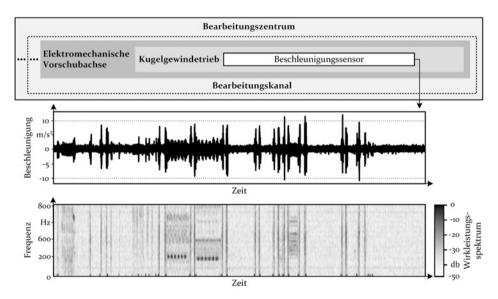


Bild 82: Detektierte Beschleunigungen bei der Fertigung einer Produktvariante sowie Spektrogramm (angelehnt an [P14, P15][S6, S20, S24, S26][289, 390-394])

5.2.4 Synthese einer Gesamtsystemarchitektur

Aus den Anforderungen und den Ergebnissen in Kapitel 4 ist die Synthese einer standardisierten Gesamtsystemarchitektur und -topologie für die modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung möglich. Neben den generischen Bestandteilen liegt der Schwerpunkt auf den lose gekoppelten Modulen für die Abbildung der spezifischen Anwendungslogik [P6].

Bild 83 zeigt die in diesem Anwendungsszenario definierte Monitoring Engine, welche der weiteren Beschreibung dient. In den nächsten drei Abschnitten wird die Funktionsweise und Methodik der Analyse über die Prozessvariablen Motordrehmoment, Umkehrspiel und Beschleunigung konzipiert und evaluiert.

5.2.5 Zustandsüberwachung durch Analyse von Motordrehmoment

Bild 84 skizziert die Methodik der Überwachung einer Vorschubachse mittels einer Motorstrom- bzw. Motordrehmomentanalyse in Anlehnung an *Imiela, Klein, Maier, Rudolf, Schopp* und *Stockinger* [369, 370, 372, 373, 378, 380]. Für die Datenakquise ist eine Nutzung definierter Referenzläufe notwendig, welche unabhängig von den Fertigungsprogrammen ohne Belastung durch den Produktionsprozess durchgeführt werden. Eingesetzte Vorschubachsen werden auf Basis eines Steuerungsprogramms sequentiell über deren Gesamtlänge verfahren.

In der Datenanalyse werden positionsbezogene Residuen zwischen nominalen Referenzwerten und fortlaufend erhobenen Motordrehmomentwerten betrachtet. Relevante Metadaten, wie Einbau- und Instandhaltungszeitpunkte, werden zu einem Referenzdatensatz annotiert. Eine im Vergleich zum Fertigungsprozess langsame Ausführung des Referenzlaufs unterstützt die Erkennung verschleißspezifischer Muster und Anomalien. Eine Datenvorverarbeitung im Automatisierungssystem umfasst die Applikation eines gleitenden Mittelwertfilters, eine zeitliche Datensynchronisation, eine Filterung ruckartiger Anfahrt- und Bremskräfte und schließlich die Speicherung beobachteter Residuen. Für die Datenvisualisierung wurde ein Generator dreidimensionaler Oberflächengraphen implementiert, der Positionsdaten, Testläufe sowie Residuen des Motordrehmoments übersichtlich visualisiert. Die Verspannung eines KGT aufgrund eines Fluchtungsfehlers konnte durch eine lokale Überhöhung des Drehmoments nach 200 Testläufen im Positionsbereich zwischen o und 200 mm erfolgreich detektiert werden (vgl. Bild 85) [P6-P8, P14, P15][S18, S20, S23, S26].

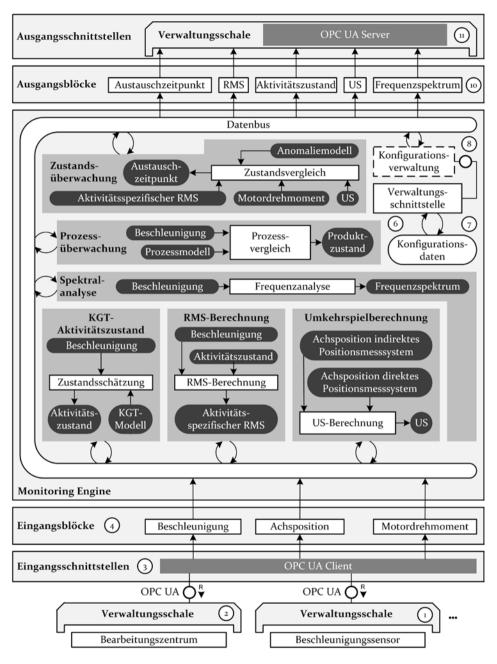


Bild 83: Entwicklungssicht der Monitoring Engine für die modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung von Bearbeitungszentren (angelehnt an [P6, P14, P15])

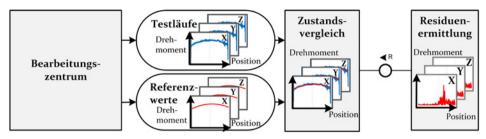


Bild 84: Zustandsüberwachung von Bearbeitungszentren auf der Grundlage von Motordrehmomentdaten (angelehnt an [S18, S23, S26])

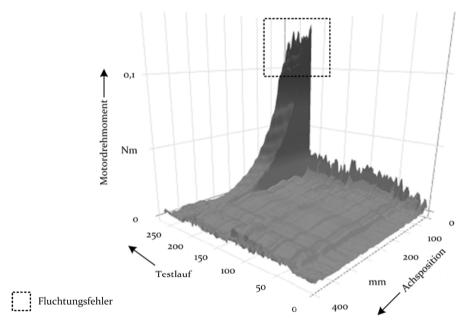


Bild 85: Visualisierung eines Fluchtungsfehlers unter Nutzung der erhobenen Motordrehmomentdaten (angelehnt an [S18, S23, S26])

5.2.6 Zustandsüberwachung durch Messung des Umkehrspiels

Als weitere Kenngröße für die Charakterisierung des Verschleißzustandes eines KGT wird das Umkehrspiel aus der Differenz der Positionsmesssysteme evaluiert (vgl. *CMFB* Umkehrspielberechnung Bild 83) [372, 377, 389, 395]. Ein indirektes Positionsmesssystem über den Drehgeber des Antriebsmotors wird durch ein direktes Positionsmesssystem auf Basis eines Glasmaßstabs zur Positionsregelung ergänzt [190]. Für die Quantifizierung dieser Kenngröße ist, analog zur Erfassung der Motordrehmomentwerte, ein separates Steuerungsprogramm notwendig. Hierfür werden die Werte

der Positionsmesssysteme während des Richtungswechsels einer Vorschubachse in einem definierten Bereich vorgenommen, bevor eine Kompensation der unterschiedlichen Positionsinformationen durch einen Positionsregler erfolgt. Eine Regeldifferenz der Positionsmesssysteme kann bestimmt werden. Diese Kenngröße ist ein Maß für die erreichbare Bearbeitungspräzision bzw. den Verschleißzustand eines KGT und korreliert positiv mit zunehmenden Verschleiß [190, 388].

Bild 86 visualisiert das Konzept der Umkehrspielmessung für eine Vorschubachse. In der graphischen Darstellung sind zwei näherungsweise konstante Bereiche erkennbar (*Hinweg, Rückweg*), welche mit der Vorwärts- bzw. Rückwärtsbewegung einer Vorschubachse korrespondieren. Ausschläge im zeitlichen Verlauf sind auf das Anfahr- und Bremsverhalten zurückzuführen. Für die Berechnung werden nur die konstanten Bereiche des *Hin*- und *Rückwegs* verwendet. Eine Streuung der Messwerte, bedingt durch Anfahr-, Brems- oder Federeffekte ist durch Mittelwertbildung nivellierbar. Aus der Existenz positionsbezogener Verschleißzustände ist ein divergierendes Umkehrspiel und damit auch eine variierende Bearbeitungspräzision entlang des Verfahrweges einer Vorschubachse beobachtbar. In Anlehnung an die Toleranzen der zu fertigenden Produkte gelten divergierende Umkehrspielgrenzwerte für die Prognose von validen Instandhaltungszeitpunkten.

Voruntersuchungen verschlissener KGT bestätigen eine Position in Höhe der Bearbeitungsposition als verschleißkritischen Bereich. Für die Reduzierung des Zeitaufwands einer Umkehrspielmessung ist die Messung daher ausschließlich an dieser Position implementiert. Unter Verwendung von Expertenwissen wurde ein Grenzwert von o,oi mm für den Austausch eines KGT festgelegt. Der beschriebene Lösungsansatz zur Bestimmung des Umkehrspiels gemäß dem Regeldifferenzverlauf kann nur für KGT in den horizontalen Einbaupositionen verwendet werden. Bei den vertikal angeordneten KGT liegen die Kugeln aufgrund der Schwerkraft an der tiefer befindlichen Kugelgewindespindelflanke an, so dass durch wechselndes Verfahren der Vorschubachse kein valides Umkehrspiel bestimmt werden kann. Auf Grundlage einer Regressionsfunktion und des Umkehrspielgrenzwertes können im Sinne einer vorausschauenden Instandhaltung die Zeitpunkte kritischer Verschleißzustände unter Nutzung des CMFB KGT-Überwachung antizipiert werden [207]. Bild 87 zeigt eine derartige lineare Regressionsfunktion, abgeleitete Warngrenzen und die Antizipation eines Austauschzeitpunkts für einen KGT in Einbauposition X des Bearbeitungszentrums [S18, S23, S26].

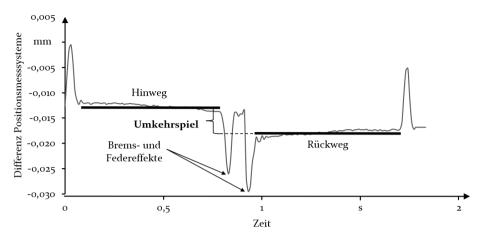


Bild 86: Bestimmung des Umkehrspiels aus der Differenz der Positionsmesssysteme (angelehnt an [S18, S23, S26])

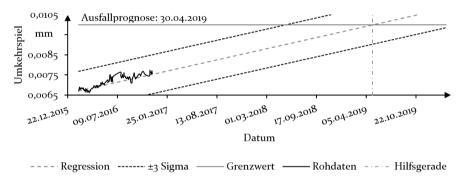


Bild 87: Prognose des Austauschzeitpunkts eines KGT auf Basis der Umkehrspielmessung sowie abgeleitete Warngrenzen (angelehnt an [S23])

5.2.7 Zustandsüberwachung durch Analyse der Beschleunigung

Komplementär zur Auswertung von Motordrehmoment und Umkehrspiel wird ein Lösungsansatz mit den Prinzipien der Schwingungsanalyse implementiert und evaluiert [P6, P14, P15][S6, S20, S24, S26, S28][190, 275, 370, 373, 375, 380, 382–388, 396]. Gemäß Kapitel 5.2.1 soll anhand der Intensität der wirkenden Vibrationen bzw. durch Auswertung des zustandsspezifischen, effektiven quadratischen Mittelwerts (Root Mean Square - RMS), der ein Maß für die im Signal enthaltene Energie darstellt, eine Aussage über die Existenz von Pittings geschlossen werden [355, 358, 382, 387]. In einem diskreten Zustand maximaler Vorschubgeschwindigkeit (Eilgang) genügt die Analyse der Standardabweichung eines Beschleunigungssignals

zur Erhebung des RMS [194, 358, 382, 388]. Für die Bildung dieses zustandsbezogenen Schlüsselindikators sind mehrere Prozessschritte notwendig, die in der Monitoring Engine definiert sind (vgl. Bild 83). Eine Abbildung des Normalverhaltens einer Vorschubachse erfolgt in diesem Anwendungsfall durch einen Zustandsautomaten, der über die Betrachtung der Prozessvariable Beschleunigung identifiziert wird. Für eine Beschreibung der Funktionsweise im vorliegenden Anwendungsfall sind $Stillstand/Produktion (s_{S/p})$, $Beschleunigen/Abbremsen (s_{b/a})$ und $Eilgang (s_e)$ als diskrete Zustände interpretierbar (vgl. Bild 88). Die Implementierung dieser Funktionalität erfolgt durch CMFB in Monitoring Engine und Modeling Engine.

Eine Identifikation diskreter Zustände eines KGT erfolgt durch die Nutzung von komponentenspezifischen Konventionen. Vordergründig kann an der Betrachtung des gleitenden Mittelwerts eines RMS erkannt werden, ob grundsätzlich ein Bearbeitungsvorgang bzw. ein Ruhezustand vorliegt (Zustand s_{b/a}). Ein Wechsel der Zustände s_{s/p} auf s_e wird durch den Zustand s_{b/a} begleitet. Der Zustand s_{s/p} wird damit im vorliegenden Produktionsprozess von zwei Zuständen s_{b/a} eingefasst. Sobald die Übergänge zwischen den KGT-Aktivitätszuständen bestimmt sind, werden die akquirierten Beschleunigungsdaten den diskreten Zuständen für die Bestimmung des RMS zugeordnet. Folglich wird der Automat um kontinuierliche Daten zu einem hybriden Automaten erweitert. Für die Erhebung des RMS sind lediglich die Abschnitte des Signals im hybriden Zustand des Eilgangs se berücksichtigt. Bild 89 demonstriert die Segmentierung des Beschleunigungssignals anhand eines Automatenmodells. Auf Grundlage der eingeführten Methode sind zustandsbezogene Datenmuster in ausreichender Präzision erkennbar. Ergänzend wird die Methodik an unverschlissenen und verschlissenen KGT ceteris paribus validiert. Ein verschlissener KGT wies bereits die für einen Verschleißzustand typischen Pittings auf. Im Zustand se konnte ein RMS für einen unverschlissenen KGT mit etwa 10,1 m/s² ermittelt werden, während der RMS für einen verschlissenen KGT mit etwa 21,5 m/s² quantifiziert wurde. Bild 90 vergleicht zwei charakteristische Beschleunigungssignalanteile bei identischer Bearbeitungsoperation. Qualitativ sind Varianz, Standardabweichung und Spitze-Spitze-Werte des Beschleunigungssignals im Fall des verschlissenen KGT bei einem zustandsbezogenen Vergleich stärker ausgeprägt. Bild 91 zeigt die Transformation von Beschleunigungssignalen im Zustand se in die Frequenzdomäne auf Basis einer Fourier-Transformation [393]. Das Ergebnis ist wegen der Vielzahl überlagerter Schwingungen in diesem Anwendungsfall eingeschränkt aussagekräftig und offeriert gegenüber der RMS-Analyse keine weiteren signifikanten Erkenntnisse [S6, S20, S24, S26][370].

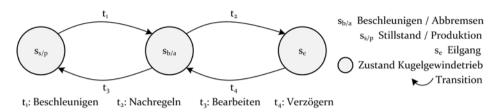


Bild 88: Zustandsautomat zur Abbildung des Verhaltens eines KGT (angelehnt an Kapitel 2.2.3 sowie [S6, S20, S24, S26])

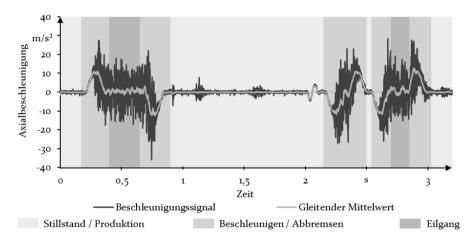


Bild 89: Segmentierung eines Beschleunigungssignals in Abhängigkeit des diskreten Zustands eines KGT (angelehnt an [S6, S20, S24, S26])

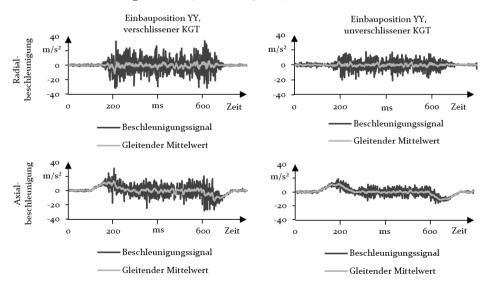


Bild 90: Vergleich identischer Bearbeitungsoperationen bei verschlissenem und unverschlissenem KGT (angelehnt an [S6, S20, S24, S26])

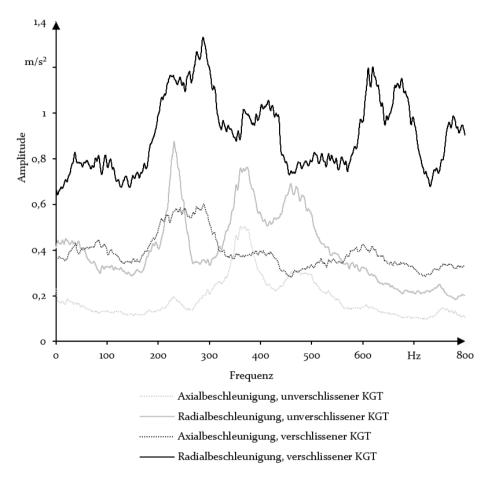


Bild 91: Frequenzbasierte Darstellung von Beschleunigungsdaten von KGT im Zustand Eilgang (angelehnt an [S6, S20, S24, S26][370, 380, 390, 391])

Abschließend erfolgt die Bereitstellung der Ergebnisse für weitere Systeme im IoTS über eine VS der Monitoring Engine. Neben dem Standard FDI wird hier ein *ConditionMonitoringBlockType* gemäß VDMA 24582 eingesetzt. Bild 92 zeigt einen relevanten Ausschnitt des OPC UA-Informationsmodells, der die berechneten Indikatoren zur Charakterisierung des KGT (*BallScrewDrive*), wie Umkehrspiel (*Backlash*), Motordrehmomentverläufe (*EngineTorque*), RMS (*RMS*), Spektrogramm der Schwingungsdaten (*SpectrogramImage* bzw. *SpectrogramValueArray*), Aktivierungszustand (*ActivityState*), Abnutzungsvorrat (*DeviceHealth*) sowie errechnete Austauschzeitpunkte (*DateOfSubstituition*) in Abhängigkeit von Einbauzeitpunkt (*AssemblyInformation*), Einbauposition (*Position*), Bearbeitungskanal (*Channel*) und Seriennummer (*SerialNumber*) bereitstellt [S6, S24].

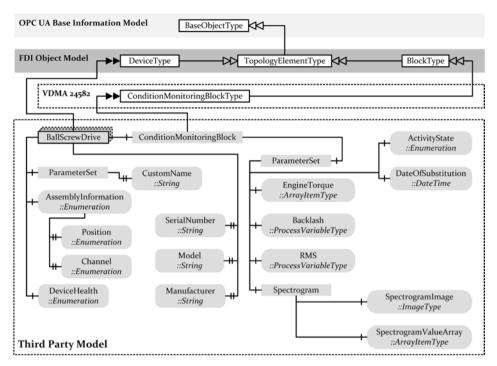


Bild 92: FDI-basiertes OPC UA-Informationsmodell für die Abbildung von berechneten Kenngrößen im vorliegenden Anwendungsfall

5.2.8 Fertigungsprozessüberwachung

Neben den Aspekten der Komponentenüberwachung ist die Evaluierung des Beschleunigungsmesssystems im Kontext der Überwachung des Produktionsprozesses Gegenstand der Untersuchung. Bild 93 gibt einen Überblick über die eingesetzte Methodik zur Modellidentifikation spanender Fertigungsprozesse in der Modeling Engine. Der Entwurf wurde im Rahmen von dissertationsbezogenen, studentischen Arbeiten validiert und ist bereits veröffentlicht [P14, P15][S6, S24, S26].

Einleitend erfolgt die Akquise der Beschleunigungsdaten eines KGT in Anlehnung an das I4.oK-Konzept (vgl. Bild 83). Die Vorverarbeitung umfasst die Transformation des Beschleunigungssignals in die Frequenzdomäne [194, 393, 394]. Ergebnis ist ein Spektrogramm, welches den zeitlichen Verlauf der Frequenzkomponenten des Beschleunigungssignals repräsentiert. Anschließend wird das Spektrogramm X mittels Non-negative Matrix Factorization (NMF) unter Anwendung eines Gradientenabstiegsverfahrens in Merkmale W und zugehörige Aktivierungskoeffizienten H dekodiert (vgl. Gleichung (6)) [397–400].

Angestrebt ist die Identifikation von Matrizen *W* und *H*, deren Produkt *X'* das ursprüngliche Spektrogramm *X* möglichst optimal wiedergibt. Einer Optimierung liegt hierbei eine Minimierung nach Gleichung (7) zugrunde.

$$X \approx WH$$
 (6)

$$\arg\min_{W,H} \frac{1}{2} ||X - WH||^2 = \frac{1}{2} \sum_{i,j} (X_{ij} - WH_{ij})^2$$
(7)

 $X: Spektrogramm \ W: Merkmale \ H: Aktivierungskoeffizienten$

Als Resultat der NMF zeichnet sich jeder Maschinenzustand durch die Aktivierung eines dominanten Merkmals aus. Bei einem Wechsel der dominanten Aktivierung kann folglich ein Zustandswechsel angenommen werden. Innerhalb jedes Zustands wird die Verteilung der korrespondierenden NMF-Aktivierungskoeffizienten durch ein Gaussian Mixture Model (GMM) beschrieben. Dieses repräsentiert gemäß Gleichung 8 eine Verteilung durch eine Überlagerung von *K* Normalverteilungen [401–405].

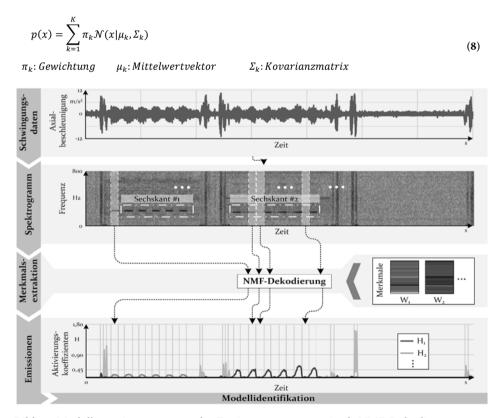


Bild 93: Modellgenerierung spanender Fertigungsprozesse mittels NMF-Dekodierung (angelehnt an [P14, P15][S20, S24, S26])

In diesem Anwendungsszenario konnten stellvertretend für weitere Anlagenaktivitäten das Fräsen zweier Sechskantmuster erfolgreich detektiert werden. Die erzeugten GMM sind potentiell für die Anomalieerkennung nutzbar. Bild 94 visualisiert die Methodik der Modellidentifikation der Modeling Engine, die eine Modellierung des KGT sowie des Fertigungsprozesses gleichermaßen berücksichtigt.

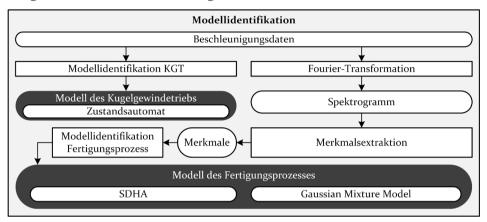


Bild 94: Identifikation eines Modells des KGT und des Fertigungsprozesses (angelehnt an [P6-P8, P14, P15][S20, S24, S26])

5.2.9 Ergebnisdiskussion

Gegenstand dieses Validierungsszenarios ist die Bewertung der Anwendbarkeit des Konzepts der Sozio-CPS zur modellbasierten Zustands- und Prozessüberwachung im Zusammenspiel mit Bearbeitungszentren. Die Applizierung der in Kapitel 4 eingeführten Gesamtsystemarchitektur sichert Übertragbarkeit und standardisiert die Implementierung. Hinsichtlich der Datenakquise entsteht durch die Definition von VS semantische Interoperabilität. Im Rahmen der Umsetzung konnte die Wiederverwendbarkeit einzelner Bestandteile, wie 3D-CPS für die Umsetzung einer ergonomischen, plattformunabhängigen, dreidimensionalen Visualisierung nachgewiesen werden.

Die Analyse der Motordrehmomentdaten erfolgt mit Hilfe von Referenzläufen. Eine wesentliche Erkenntnis ist, dass trotz unveränderter Systemkomponenten divergierende, achspositionsbezogene Motordrehmomente beobachtbar sind. Dennoch konnten im Rahmen der Validierung Verspannungen und Fluchtungsfehler von KGT erfolgreich erkannt werden. Die bisherige Umsetzung ist die erste Ergebnisgrundlage für die Ableitung eines übertragbaren Referenzdatensatzes, der wiederum eine Grundlage für die Erzeugung von Hüllkurven und Verschleißmodellen darstellt. Mit der Umkehrspielmessung kann ein Verfahren implementiert werden, das ebenfalls einen separaten Testlauf benötigt, jedoch die Umsetzung einer Funktionalität zur vorausschauenden Instandhaltung erlaubt. Nachteilig ist allerdings die Tatsache, dass für die Identifikation von Grenzwerten ein hohes Maß an Expertenwissen bzw. Versuchen notwendig ist. Die Überwachung des Fertigungsprozesses zur Laufzeit ist aufgrund der Notwendigkeit von Prüfläufen weder mit der Prozessvariable Motordrehmoment noch mit der Umkehrspielmessung möglich. Ergänzend wird die Integrierbarkeit eines externen Systems zur Schwingungsanalyse in ein Sozio-CPS evaluiert. Beschleunigungssignale im Zustand Eilgang werden als Prozessvariablen erfolgreich zur Berechnung des RMS eingesetzt, der als Schlüsselindikator für die Charakterisierung des Abnutzungsvorrats eines KGT dient.

Ausblickend wird ein Konzept zur Überwachung spanender Fertigungsprozesse entwickelt. Mehrere Ziele zur Schaffung von Transparenz im Fertigungsprozess werden dabei erreicht. Potentiell ist eine Beurteilung der Produktqualität bereits während der Fertigung möglich, so dass Intensität und damit Kosten nachgelagerter Kontrollen reduzierbar werden. Zudem ist die Identifikation von Ereignissen wie Fertigungsanomalien, Werkzeugschäden und Kollisionen im Bearbeitungsraum möglich. Zusammenfassend konnte ein Sozio-CPS implementiert werden, das den Menschen bei Zustands- und Prozessüberwachung, Instandhaltung und Betrieb von Bearbeitungszentren unterstützt.

5.3 Fügeverfahren im Elektromaschinenbau

Im Fokus dieses Anwendungsfalls steht die Umsetzung einer modellbasierten Zustands- und Prozessüberwachung für Fügeverfahren am Beispiel einer Heißcrimpanlage auf Grundlage der definierten Gesamtsystemarchitektur. Ziel ist die Evaluation von Prozess- und Produktqualität unter Verzicht von zeit- und kostenintensiven Qualitätskontrollen. Ausgewählte Ergebnisse wurden im Rahmen von studentischen Arbeiten unter der fachlichen Anleitung des Autors erprobt und in Form von dissertationsbezogenen Publikationen der internationalen Fachwelt zugänglich gemacht [P9, P11][S2, S9-S12, S22, S24-S26, S29].

5.3.1 Ausgangssituation und Voruntersuchung

Das Heißerimpen stellt ein Widerstandsschweißverfahren dar, das mechanische Crimptechnik mit einem thermischen Abisolationsvorgang verknüpft [406, 407]. Lösungsansätze und Methoden zur Überwachung von Fügeprozessen sind im Stand der Technik und Forschung verfügbar

[408–411]. Spreng et al. bieten eine umfassende Untersuchung und Modellierung der Grundlagen des Heißcrimpprozesses [412–414]. Die Nichtverfügbarkeit von Referenzarchitekturen für die Entwicklung von Hard- und Softwaresystemen zur modellbasierten Zustands- und Prozessüberwachung stellt jedoch eine Herausforderung dar. Methoden für die effiziente Realisierung unter Beachtung von Aspekten der Sozio-CPS und semantischer Interoperabilität sind weitestgehend unerforscht.

Während des Fügeprozesses entstehen Prozesstemperaturen bis etwa 610 °C und mechanische Spannungen, was zu variierenden, material- und geometrieabhängigen Elektrodenstandzeiten führt und damit einen Nachteil dieses Verfahrens darstellt [P9][412]. Hinsichtlich der Beurteilung der Verbindungsqualität ist das Verfahren der Widerstandsmessung geeignet [Po]. Bild 95 zeigt wesentliche Komponenten der untersuchten Heißcrimpanlage, Elektrodenpaare sowie ein gefügtes Kabel.

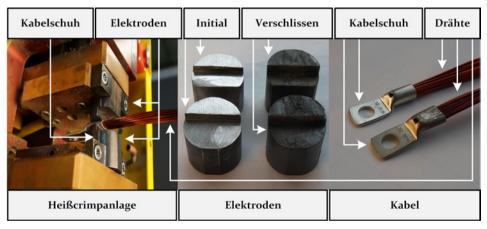


Bild 95: Heißcrimpanlage für die Realisierung von Fügeverfahren im Elektromaschinenbau, Elektroden sowie Kabel

Lösungsansatz 5.3.2

Für die Lösung der eingeführten Problemstellung wird ein Sozio-CPS entwickelt, das die Bewertung des Zustands von Elektroden als Verschleißkomponenten einer Heißcrimpanlage sowie die Prognose der Produktbzw. Verbindungsqualität zur Laufzeit des Produktionsprozesses erlaubt. Hierbei werden der Stand der Technik und Forschung sowie die Einsetzbarkeit der Prozessvariablen Elektrodentemperatur, elektrische Scheinleistung und elektrische Energie untersucht [264, 413, 414]. Die Elektrodentemperatur ist als Prozessvariable geeignet, um die Qualität der Verbindung während eines Fügeprozesses zu überprüfen und wird mittels eines Infrarotthermometers erhoben [Po].

Ergänzend ist die Überwachung und Antizipation von Austauschzeitpunkten der Elektroden mittels elektrischer Energiedaten als wesentliche Verschleißelemente angestrebt. Eine Oxidationsschicht auf den Elektroden nimmt mit steigender Anzahl an durchgeführten Fügezyklen zu, worauf die in das Werkstück eingebrachte Energie zur Verdampfung der Isolation der Leiter sinkt. Weiterhin steigt die Auftrittswahrscheinlichkeit fehlerhafter Fügeverbindungen aufgrund unzureichender Wärmeeinbringung und Rückständen des Isolationsmaterials der Kupferleiter. Messbar ist ein erhöhter elektrischer Widerstand gefügter, jedoch nichtfunktionaler Kabel [Po][414]. Mit der eingeführten Referenzarchitektur kann ein Gesamtsystem umgesetzt werden, das die wesentlichen Komponenten zur Datenakquise (I4.0K), Modellidentifikation (Modeling Engine), Zustands- und Prozessüberwachung (Monitoring Engine) und zur Integration des Nutzers (3D-CPS und D-CPS) enthält. Analog zum Anwendungsfall der mehrspindligen Bearbeitungszentren, stehen auch hier keine Steuerungsinformationen für die Modellidentifikation zur Verfügung.

5.3.3 Datenakquise und -visualisierung

Die Umsetzung einer VS für die Bereitstellung der Prozessvariablen erfolgt auf der Grundlage von OPC UA DA bzw. OPC UA HA sowie einem Einplatinencomputer (vgl. Bild 96). In diesem Fall wurden Provider-Konzepte für die Kommunikationsstandards ModbusTCP und RS-485 umgesetzt [343]. Ein externes Messystem dient der Erhebung von Temperaturdaten, während die Energiedaten der Heißcrimpanlage mit dem in Kapitel 2.5 eingeführten Messsystem bereitgestellt werden [264]. Analog zu den vorherigen Anwendungsfällen wurde ein Informationsmodell definiert, das einen Beitrag zur semantischen Interoperabilität im vorliegenden Validierungsszenario leistet (vgl. Bild 97).

Typen der Heißcrimpanlage (ThermoCrimpMachineDeviceType) sowie der Messsysteme (TemperatureMeasuringDeviceType, ElectricalEnergyMeasuringDeviceType, ResistanceMeasuringDeviceType) werden mit Identifikationsnummer (SerialNumber), Hersteller- und Modellbezeichnung (Manufacturer/Model) weiter beschrieben. Die Prozessvariablen Elektrodentemperatur, Schein- und Wirkleistung sowie Widerstand sind optional in eigenen Knoten abbildbar (Temperature, ApparentPower, ActivePower, Resistance) [S24]. Weiterhin ist eine dreidimensionale Browservisualisierung gemäß dem 3D-CPS-Konzept realisierbar, die durch Aspekte semantischer Interoperabilität nur eines geringen Konfigurationsaufwands bedarf (vgl. Kapitel 4.4). Entsprechend der eingeführten Referenzarchitektur wird in den nachfolgenden Kapiteln ein Gesamtsystem synthetisiert und evaluiert.

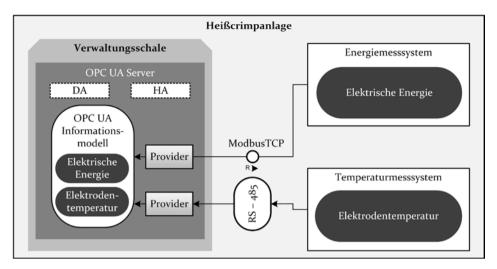


Bild 96: Aufbau einer VS für die Bereitstellung von Energie- und Temperaturdaten

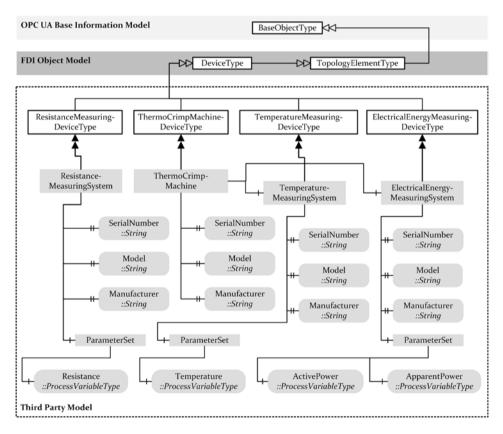


Bild 97: FDI-basiertes OPC UA-Informationsmodell für die Abbildung von Heißcrimpanlagen im vorliegenden Anwendungsfall

5.3.4 Modellidentifikation

Ein wesentlicher Bestandteil des Gesamtsystems ist die Realisierung einer modellbasierten Zustands- und Prozessüberwachung. Neben Elektrodentemperatur und Scheinleistung stellen Metriken der Prozessvariablen (Temperaturintegral bzw. elektrische Energie) Kenngrößen für die Modellbildung dar (vgl. Kapitel 2.2.1). Während die Überwachung des Fügeprozesses auf Basis der Elektrodentemperatur zur Laufzeit erfolgt, werden Elektrodenaustauschzeitpunkte über die beobachtete elektrische Energie entlang einer Reihe gefügter Kabel antizipiert.

Die simulative Berechnung der elektrischen und thermischen Energie mit Hilfe eines White-Box-Modells und der implementierten Messsysteme ist ein möglicher Lösungsansatz für die definierte Problemstellung. Voraussetzung ist die Bestimmung einer Vielzahl von Modellparametern, wie spezifische Wärmekapazitäten, Geometrien, Volumen und Massen des Elektrodenmaterials, Kabelschuhen und Einzelleitern sowie die Erstellung einer präzisen Wärmebilanz. Zusammenfassend ist die Modellierung von Produkt (Kabel), Prozess (Fügeprozess) und Ressource (Heißcrimpanlage) zur Prognose der Schein- bzw. Wirkleistung und Elektrodentemperatur mit Expertenwissen verbunden [412-414] (vgl. Kapitel 2.6). In diesem Validierungsszenario wird dementgegen ein Lösungsansatz auf Grundlage der automatisierten, datengetriebenen Erstellung eines Black Box-Modells entwickelt. Ein identifiziertes Fügeprozessmodell abstrahiert unterschiedliche Prozessparameter, variierende Elektrodenmaterialien und -geometrien. Das Überschreiten eines statischen Schwellwerts wird für die Detektion von Beginn und Ende eines Fügezyklus im Rahmen der Modellgenerierung eingesetzt. Identifizierte Automaten besitzen folglich drei Zustände (Aus / Warten / Fügen), welche die Prozessvariablen Elektrodentemperatur, Schein- und Wirkleistung beinhalten. Bild 98 visualisiert den zeitlichen Verlauf der Prozessvariablen Scheinleistung und Elektrodentemperatur sowie den diskreten Anlagenzustand.

Basierend auf der VS wird eine Methode zur Zustands- und Prozessüberwachung der Elektroden bzw. des Produktionsprozesses entwickelt. Die Prognose von Elektrodenaustauschzeitpunkten stellt einen entscheidenden Beitrag für die Etablierung vorausschauender Instandhaltung dar. Gemäß der Voruntersuchung wird hierfür das eingeführte Messsystem zur Erhebung der Scheinleistung der Heißcrimpanlage eingesetzt (vgl. Kapitel 2.5). Nach der Erhebung der Prozessvariable wird die aufgenommene elektrische Energie einer Fügeoperation errechnet, einem Elektrodenlebensdauermodell zugeführt und die Wahrscheinlichkeit eines fehlerhaften

Produkts prognostiziert. Weiterhin wird die Einordnung gefügter Kabel in die Klassen funktional oder fehlerhaft mit der Prozessvariable Elektrodentemperatur sowie eines Fügeprozessmodells angestrebt. Ist eine charakteristische Differenz im zeitlichen Verlauf der Energiewerte zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fügeoperationen erkennbar, so wird die Durchführung eines Elektrodenaustausches antizipiert. Anschließend wird der Fügezyklenspeicher mit dem gespeicherten Energieverbrauch der vorherigen aktiven Elektrode an eine Modeling Engine übertragen und der Fügezyklenspeicher der Monitoring Engine erneut initialisiert. Mit dieser erweiterten Datengrundlage erfolgt die Identifikation eines neuen Elektrodenlebensdauer- und Fügeprozessmodells, das an die Monitoring Engine unter Nutzung der Konfigurationsschnittstellen übertragbar ist. Die Ausführung der Monitoring Engine erfolgt damit unabhängig vom Identifikationsvorgang. Die Möglichkeiten der Interaktion zwischen Anwender und CPS im vorliegenden Anwendungsszenario umfassen die Kontrolle über den Erstellungsprozess von Modellen und Klassifikatoren, die Steuerung des Modelltransfers, die Korrektur von Fügeergebnissen bzw. Widerstandsmessungen sowie das Setzen einer Widerstandsgrenze für die Fügeergebnisklassifikation. Bild 99 zeigt das Zusammenspiel von physischem System, Messsystemen, VS, CPS, Modeling Engine, Monitoring Engine, 3D-CPS und D-CPS in einem Sozio-CPS. Fokussiert wird nachfolgend die Umsetzung der Monitoring Engine [P6-P9][S24, S26, S29].

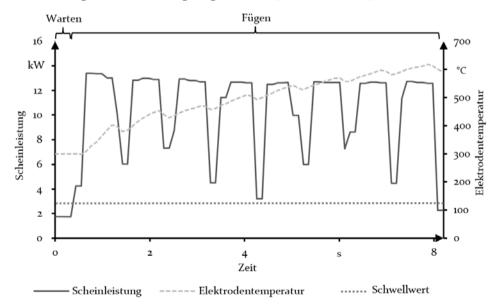


Bild 98: Verlauf der Prozessvariablen Scheinleistung und Elektrodentemperatur während eines Fügevorgangs

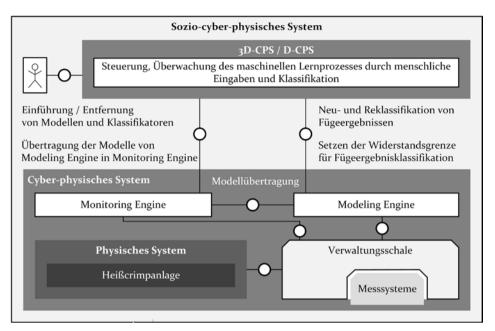


Bild 99: Synthese einer Gesamtsystemarchitektur sowie Definition der Interaktionsmechanismen des konzipierten Sozio-CPS (angelehnt an [P8, P9][S26, 29])

5.3.5 Synthese einer Gesamtsystemarchitektur

In der Monitoring Engine erfolgt die reflektorische Informationsverarbeitung zur Prognose der Elektrodenaustauschzeitpunkte sowie zur Bewertung der Verbindungsqualität der Fügeprodukte auf Grundlage der generierten Modelle (vgl. Bild 100). Eingangs wird die Akquise von Prozessvariablen (Elektrische Energie und Elektrodentemperatur) unter Nutzung von Eingangsschnittstellen und -blöcken von VS vorgenommen (1)(2)(3). Auf Basis der Problemstellung und des Lösungsansatzes ergeben sich zwei Agenten für die Realisierung der Anwendungslogik. Der CMFB Zustandsüberwachung (4) realisiert Funktionalitäten zur Prognose der Elektrodenausfallwahrscheinlichkeit. Ein CMFB Prozessüberwachung (5) stellt Funktionalitäten zur Überwachung des Fügeprozesses bereit. Eingangsdaten stellen Elektrodenverschleiß- bzw. Fügeprozessmodell sowie elektrische Energie und Elektrodentemperatur dar. Im Rahmen der Merkmalsextraktion werden elektrische Energie pro Fügeoperation (Zustandsmerkmal) sowie Änderungsraten der Elektrodentemperatur und Temperaturintegral (Prozessmerkmal) generiert. Für die Prognose von Elektrodenzustand bzw. Ausfallwahrscheinlichkeit und Fügeergebnis wurden ebenfalls zugehörige Agenten implementiert. Ausgangsdaten stellen Informationen über Fügeergebnisse, Anomalien und Ausfallwahrscheinlichkeiten dar.

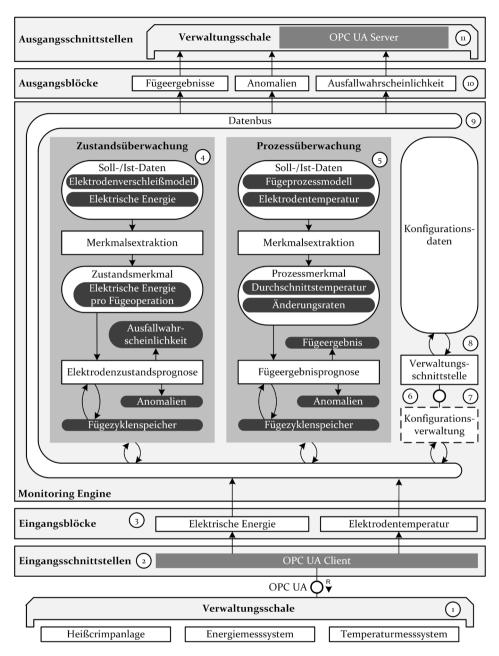


Bild 100: Entwicklungssicht der Monitoring Engine für die modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung von Heißcrimpanlagen (angelehnt an [P6, P9])

Die Modelle für die Monitoring Engine werden mittels der Konfigurationsverwaltung sowie der Verwaltungsschnittstelle bereitgestellt (6)(7)(8). Ergebnisse des Systems werden in einem Fügezyklenspeicher persistiert. Teilsysteminterne Kommunikation wird über einen Datenbus realisiert (9). Fügeergebnisinformationen, Ausfallwahrscheinlichkeit sowie Anomalien der Prozessvariablen im Fügeprozess werden über Ausgangsblöcke, Ausgangsschnittstelle bzw. eine VS exportiert (10)(11) [P9]. Die Struktur der VS für den Export der Ergebnisse der Monitoring Engine ist in Bild 101 dargestellt [P11]. Analog zu den Vorgängerkapiteln sind die FDI-spezifischen Elemente wie Hersteller- und Modellbezeichnung sowie die Seriennummer (Manufacturer/Model/SerialNumber), Elektrodenbezeichnung (CustomName), Elektrodenpaar (ElectrodeSet) und eine Erweiterung der VDMA 24582 Blockdefinition enthalten (ConditionMonitoringBlockType).

Neben diesen Elementen sind der Abnutzungsvorrat des Elektrodenpaares (*DeviceHealth*), der prognostizierte Austauschzeitpunkt (*DateOfSubstitution*), die Anzahl durchgeführter Fügeoperationen (*JoiningCycles*), der Aktivitätszustand der Heißcrimpanlage (*ActivityState*) sowie eine fügeoperationsspezifische Temperatur (*CrimpTemperature*) bzw. die elektrische Energie aufgeführt (*ElectricalEnergy*).

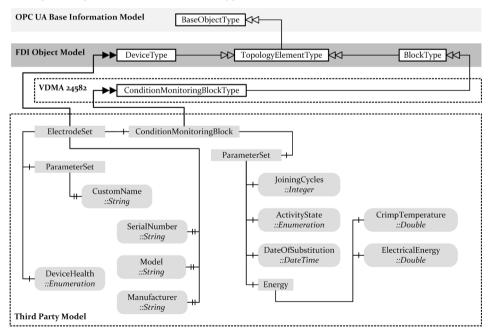


Bild 101: FDI-basiertes OPC UA-Informationsmodell für die Abbildung von berechneten Kenngrößen im vorliegenden Anwendungsfall

5.3.6 Vorausschauende Instandhaltung

Zur Validierung des Systems wurden Fügeoperationen mit einem Elektrodenpaar entlang vom Neu- bis in den Verschleißzustand durchgeführt. Bild 102 visualisiert die mit der Monitoring Engine quantifizierten elektrischen Energiemengen der Fügeoperationen. Auf Basis von Expertenwissen wird eine hergestellte Verbindung als fehlerhaft klassifiziert, wenn der gemessene Widerstand eines Kabels 0,01 Ω bei einer Probenlänge von 30 cm übersteigt. Mit sinkenden thermischen Energieeintrag erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass Isolationsmaterial nicht vollständig verdampft und folglich die Fügeverbindung nichtfunktional ist. In Abhängigkeit der Anwendung kann eine Grenze für den Austausch des Elektrodenpaares festgelegt werden. Das Verhältnis zwischen Gut- und Schlechtteilen (Fehlerwahrscheinlichkeit) geht mit der Notwendigkeit des Elektrodenaustausch einher und wird mit einem Sliding Window unter Zuhilfenahme der Widerstandswerte der Fügeverbindungen erhoben [P9][S26, S29][415].

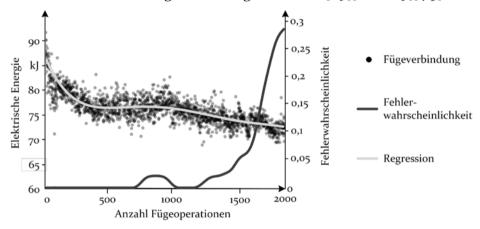


Bild 102: Visualisierung der ermittelten konsumierten elektrischen Energie pro Fügeoperation sowie Fehlerwahrscheinlichkeit einer nichtfunktionalen Fügeverbindung (angelehnt an [P9][S26, S29])

5.3.7 Fügeprozessüberwachung

Ergänzend zur Elektrodenüberwachung ist die Evaluation des Fügeprozesses Teil dieses Validierungsszenarios. Bild 103 zeigt eine grundsätzliche Korrelation zwischen elektrischem Widerstand einer Probe und der Fügetemperatur. Vertiefend repräsentiert Diagramm I eine charakteristische Temperaturkurve für ein funktionales Kabel (vgl. Bild 104). Dementgegen zeigt Diagramm II den Fehlerfall eines zu geringen Wärmeeintrags. Ergänzend konnte mit der Funktion zur Detektion von lokalen Minima und Maxima (Minima/Maxima-Analyse gemäß Kapitel 4.3.1) sowie einer darauf

aufbauenden linearen Regression der lokalen Maxima eine charakteristische Steigung ermittelt werden, die einen Rückschluss auf die Funktionalität einer Fügeverbindung zulässt. Die zugrundeliegende Prozessqualitätsbewertung wurde bereits detailliert veröffentlicht [P9].

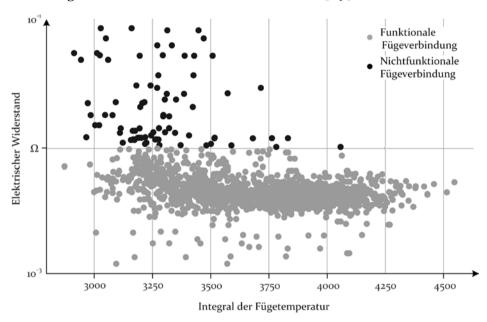


Bild 103: Visualisierung des Zusammenhangs von Temperaturintegral und dem resultierenden elektrischen Widerstand einer Probe (angelehnt an [P9][S29])

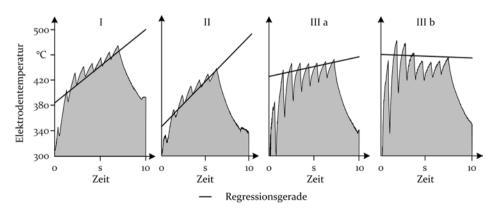


Bild 104: Wertverläufe eines fehlerfreien Fügeprozesses (I) und fehlerhafter Fügeprozesse (II und III a und III b) (angelehnt an [P9][S26, S29])

Bild 105 verdeutlicht das Konzept zur Integration des Menschen im Heißcrimpprozess. Neben der Auswahl von zugrundeliegendem System (System), Zustand (State) und Analysezeitraum (Time Range) sind eine Identifikation für die Fügeprodukte (*Product ID*), ein Zeitstempel (*Time*), die Dauer der Fügeoperation (Duration), eingebrachte elektrische Energie (Energy), Elektrodentemperatur (Temperature) sowie gemessener und antizipierter Widerstandswert (Resistance Prediction / Resistance Retrodiction) sowie eine benutzermodifizierbare Gewichtung der Ergebnisse (Weight) verfügbar.

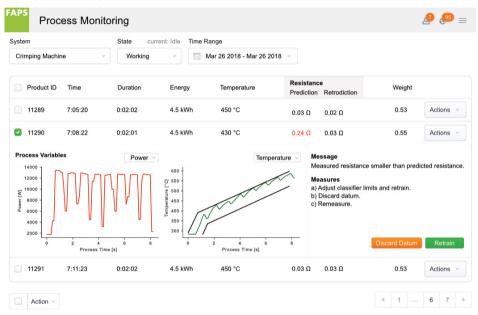


Bild 105: Entwurf der graphischen Benutzeroberfläche eines Assistenzsystems für die Rückführung von Benutzerwissen im Kontext von Fügeverfahren im Elektromaschinenbau

Ergebnisdiskussion

In diesem Validierungskapitel wird ein Sozio-CPS für Heißcrimpanlagen umgesetzt. Die Implementierung folgt der eingeführten Gesamtsystemarchitektur in Kapitel 4 und ist Ausgangspunkt für die Realisierung einer vorausschauenden Instandhaltungsstrategie. Für einen vollständigen Verzicht auf nachgelagerte Qualitätsprüfungen ist die Verbesserung der Fügeprozessklassifikation und die quantitative Validierung der Ergebnisse erforderlich. Eine differenzierte Berücksichtigung von spontanen Temperaturverlaufsänderungen im Abkühlzustand kann zudem die Fügeergebnisklassifikation präzisieren.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die fortschreitende Verbreitung des Internets der Dinge und Dienste eröffnet neue Chancen und Herausforderungen für die Industrieproduktion. Neben der Möglichkeit zur Effizienzsteigerung durch cyber-physische Systeme impliziert der Einsatz vielschichtiger Informations- und Automatisierungstechnologie eine steigende technische Komplexität, die im Rahmen der Betriebsführung und Instandhaltung mit Hilfe von Systemen der Zustands- und Prozessüberwachung kontrolliert werden muss. Deren Umsetzung erfolgt mit Hilfe von geschlossenen Informationssystemen mit jeweils unterschiedlicher Leistungsfähigkeit, Funktionalität und Softwarearchitektur, verteilt auf heterogene Systemkomponenten. Folglich entsteht ein geringes Maß an Wiederverwendbarkeit realisierter Anwendungslogik sowie eine zeitintensive und fehleranfällige Verteilung von Systemen.

Referenzarchitekturmodelle eröffnen die Chance zur standardisierten Formulierung von wartbaren, lernenden und skalierbaren cyber-physischen Systemen unter Beachtung von Aspekten der Emergenz, Orchestrierbarkeit, semantischer Interoperabilität sowie der Einbindung des Menschen. Aufbauend auf den Ergebnissen des Forschungsprojekts Ressourcen-Cockpit für sozio-cyber-physische Systeme hat die vorliegende Dissertationsschrift den Anspruch, ein sozio-cyber-physisches System für die modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung von Smart Factories zu entwickeln. Durch die Umsetzung sozio-cyber-physischer Systeme soll für den menschlichen Bediener nutzerwahrnehmbare Komplexität reduziert und Transparenz hergestellt werden. Insgesamt können sechs unterschiedliche Teilsysteme synthetisiert werden, die in Kombination ein konsistentes Gesamtsystem ergeben, das die Limitierungen des Stands der Technik und Forschung reduziert. Dies umfasst die Entwicklung von Verwaltungsschalen zur Qualifizierung von Gegenständen zu Industrie 4.0-Komponenten.

Der Entwurf der Modeling Engine erlaubt die standardisierte Applikation von Lernalgorithmen zur automatisierten Erzeugung von Black Box-Modellen in einer Vielzahl von Anwendungsbereichen. Identifizierte Modelle bilden die Grundlage für die modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung sowie die Selbstoptimierung. Die Monitoring Engine stellt eine Teilsystemarchitektur dar, die eine prozessnahe Analyse von Steuerungsinformationen und Prozessvariablen zulässt. Der hohe Grad an Modularität im Framework liefert signifikante Beiträge zur fortlaufenden Gestaltung und architektonischen Entwicklung des Internet der Dinge und Dienste. Im Detail gestatten Funktionsblockkonzept, lose Kopplung, ereignisgesteuerte

Informationsverarbeitung und erweiterte Konfigurationsmöglichkeiten eine deutliche Effizienzsteigerung im Systementwurf. Das eingeführte 4+2-Sichtenmodell lässt eine Beurteilung des Softwaresystems aus der Perspektive unterschiedlicher Interessengruppen zu und verdeutlicht die Vorteile gegenüber bestehenden Lösungen. Die integrierte Untersuchung von Informations-, Automatisierungs- und Product-Lifecycle-Management-Systemen zusammen mit Aspekten der Integration menschlicher Bediener stellt einen weiteren Schwerpunkt dieser Forschungsarbeit dar. Das 3D-CPS-Konzept bietet die Möglichkeit zur Entwicklung dreidimensionaler, browserbasierter Mensch-Maschine-Schnittstellen. Eine konsequente Nutzung der Vorzugsstandards Automation Markup Language und Open Platform Communications Unified Architecture befähigt zur effizienten Konfiguration und Einrichtung des Systems, trägt der Emergenz von cyber-physischen Systemen Rechnung und bildet die Grundlage für eine komponentengenaue Visualisierung von Anomalien, Fehlerbeschreibungen sowie Handlungsanweisungen. D-CPS beschreibt abschließend die Einbindung des Nutzers. Instandhalter und Betriebsführer können ihr Wissen durch die Anlage von Fehlerbeschreibungen und Handlungsanweisungen formalisieren. Benutzereingaben dienen als weitere Datengrundlage maschineller Lernverfahren. Lösungsansätze der modellbasierten Zustands- und Prozessüberwachung und des Wissensmanagements werden zusammengeführt, woraus wertvolle Einblicke für die Verbesserung von Instandhaltungsprozessen gewonnen werden.

Validiert wird das Gesamtsystem in drei Szenarien. Hierbei stehen jeweils anwendungsspezifische Aspekte im Vordergrund. Die Entwicklung am Beispiel von wandlungsfähigen Prüfsystemen thematisiert die Prozessvariablen elektrischer Energie und Druckluftverbrauch. Während der Implementierung werden die Chancen von Webtechnologien in diesem Kontext evaluiert. Eingeführte Konzepte der Optimierung stellen eine Ausgangsbasis für eine Effizienzsteigerung in der industriellen Produktion dar. Im Anwendungsfall der mehrspindligen Bearbeitungszentren erfolgt die Zustandsüberwachung von Kugelgewindetrieben und die Überwachung spanender Produktionsprozesse auf Basis der eingeführten Gesamtsystemarchitektur. Hierfür werden die Prozessvariablen Motordrehmoment. Umkehrspiel und Beschleunigungsdaten analysiert. Kostengünstige mikroelektromechanische Systeme und Sensoren erlauben die Skalierung auf eine Vielzahl weiterer Anwendungsfälle. Anschließend wird eine Methode für die Überwachung spanender Produktionsprozesse eingeführt, die keinen Zugriff auf diskrete Steuerungsinformationen erfordert. Die Antizipation von Grenzwerten bzw. die Entwicklung einer universellen Kenngröße für die

vollständige Charakterisierung des Verschleißverhaltens von Kugelgewindetrieben, die Identifikation und Parametrisierung von Hidden Markov Modellen mit identifizierten Gaussian Mixture Models sowie die statistische Absicherung der Ergebnisse sind Ausgangspunkt weiterer Forschungsarbeiten [P14, P15]. Das Validierungsszenario der Heißcrimpanlage adressiert einen Anwendungsfall im Bereich der Kabelproduktion. Eine Modellbildung ohne den Zugriff auf diskrete Steuerungsinformationen ist möglich. Neben der Zustandsüberwachung von Verschleißkomponenten konnte eine Klassifikation der Fügeergebnisse erreicht werden. Elektrische Energie- und Elektrodentemperaturdaten eröffnen die Aussicht zur Steigerung der Ressourcen- und Energieeffizienz und stellen die Grundlage zur Reduzierung des Prüfaufwands für hergestellte Produkte dar.

Entlang der Systemkonzeption und Validierung werden unterschiedliche Self-X-Aspekte wie Selbstkonfiguration, Selbstmodellierung, Selbstdiagnose und Selbstoptimierung im industriellen Anwendungskontext entwickelt und praktisch umgesetzt. Die durchgängige Nutzung des Modellierungsstandards Fundamental Modeling Concepts sichert Übertragbarkeit über die Anwendungsbereiche dieser Dissertationsschrift hinaus. Technologisch werden die Vorzugsstandards des Referenzarchitekturmodells Industrie 4.0 für die übertragbare Entwicklung eingesetzt. Eine erfolgreiche Instanziierung in drei heterogenen Validierungsszenarien beweist die Korrektheit und Anwendbarkeit der Lösungsansätze. Die konsequente Nutzung semantischer Interoperabilitätsstandards und serviceorientierter Architekturen stellt Kompatibilität der entwickelten Ergebnisse mit einer Vielzahl weiterer Anwendungsszenarien her.

Die Ergebnisse implizieren weiterführenden Forschungsbedarf. Mit den eingeführten Artefakten wird ein Beitrag für die Gestaltung von Plattform-Ökosystemen im Kontext technischer Dienstleistungssysteme im Förderprojekt PRODISYS geleistet [290]. Teilsysteme sind im Kontext der Allokation von Instandhaltungsaufgaben unter Berücksichtigung von Produktionsplänen und beteiligten Stakeholdern einsetzbar. Hier werden Systeme der Zustands- und Prozessüberwachung Teil eines ganzheitlichen, serviceorientierten Geschäftsmodells, sodass eine starke Bindung von Komponenten- und Anlagenherstellern sowie Endanwendern erzeugt wird. Für die Realisierung dieses Entwurfs ist die Definition von Methoden zur Modellierung und Implementierung der Interaktion von Entitäten, die in komplexen Wertschöpfungsnetzwerken miteinander verbunden sind, notwendig [109, 416].

7 Summary and outlook

The progressive expansion of the internet has created new opportunities and challenges for industrial companies. As well as the potential to rise efficiency through cyber-physical systems, the use of multilayered information and automation systems promotes growing technical complexity. This must be mastered within the scope of operational management and maintenance through the use of monitoring systems. They are implemented with the aid of closed information systems, which have varying performance, functionality, and software architecture, distributed over heterogeneous system components. Consequently, the reusability of implemented application logic is limited. Additionally, the distribution of systems is time-consuming and error-prone.

Reference architecture models allow the standardized formulation of maintainable learning and scalable cyber-physical systems, which account for aspects of emergence, orchestration, semantic interoperability and human integration. Founded on the results of the research project "resource cockpit for socio-cyber-physical systems" this thesis aims to develop a socio-cyber-physical system for the model-based condition and process monitoring of smart factories. The operation of socio-cyber-physical systems is intended to reduce user-perceptible complexity and create transparency for human operators. A total of six different systems can be synthesized, which results in a consistent system that reduces the limitations of the state-of-the-art technology and research. This includes the development of Asset Administration Shells for the upgrading of objects to Industry 4.0 Components.

When applying the concept of the modeling engine, the standardized application of learning algorithms for the automated generation of black box models is possible in a variety of application areas. Identified models form the foundation for model-based condition and process monitoring as well as self-optimization. The monitoring engine introduces a subsystem architecture that permits the decentralized analysis of control information and process variables. High modularity within the framework provides significant contributions to the ongoing design and architectural development of the internet of things and services. Specifically, the function block concept, loose coupling, event-driven information processing, and extended configuration options allow significantly improved efficiency in system design relative to the state-of-the-art research. An assessment of

this software system from the perspectives of different interest groups illustrates advantages over other existing solutions. This research also examines information, automation, and product lifecycle management systems in addition to aspects of the integration of human operators. The 3D-CPS concept offers the potential to develop three-dimensional, browser-based human-machine interfaces. Consistent use of the Automation Markup Language and Open Platform Communications Unified Architecture standards allows efficient configuration and setup of the system, accounts for the emergence of cyber-physical systems, and allows the component-specific visualization of anomalies, error descriptions, and instructions. The integration of the user is described through D-CPS. Maintenance personnel and plant operators can formalize their knowledge by creating instructions and fault descriptions. Solutions for model-based condition and process monitoring as well as knowledge management are combined. This yields valuable insights regarding the improvement of maintenance processes.

This entire approach is validated in three scenarios, which each examine application-specific aspects. Using the case of versatile test systems, development addresses the variables of electrical energy and compressed air consumption. During implementation, web technologies are evaluated in this context. The concepts of self-optimization represent the potential for increased efficiency in industrial production. In the case of multi-spindle machining centers, the condition monitoring of ball screw drives and the monitoring of production processes are conducted founded on the overall system architecture. The variables motor torque, backlash, and structureborne sound are analyzed for this purpose. Cost-effective microelectromechanical systems and sensors allow scaling to a variety of other applications. A procedure for monitoring production processes that does not require access to discrete control signals is then introduced. The anticipation of limit values and the development of a universal parameter for the complete characterization of the wear behavior of ball screw drives, the identification and parameterization of Hidden Markov Models with identified Gaussian Mixture Models and the statistical validation of the results must be addressed by further research work [P14, P15]. The validation scenario of the hot crimping system addresses an application case concerning cable production. Modeling without access to discrete control signals is also possible in this case. In addition to the condition monitoring of wear components, a classification of the corresponding results could be achieved. Electrical energy and electrode temperature data allow enlarged resource as well as energy efficiency and form the basis for reducing the testing workload for manufactured products.

Together with the system concept and validation, different self-x capabilities, such as self-configuration, self-modeling, self-diagnosis, and self-optimization, are developed and implemented in the industrial application context. Through the consistent use of the modeling standard Fundamental Modeling Concepts, the results are applicable beyond the scope of this dissertation. Technologically, the preferred standards of the Reference Architectural Model Industry 4.0 are used for targeted and transferable development. Successful instantiation in three heterogeneous validation scenarios proves the accuracy and applicability of the developed concepts. Consistent use of semantic interoperability standards, service-oriented architectures and reference architecture conformity ensures compatibility of the developed results with a variety of other application scenarios.

The results of this research indicate directions for further research. The developed system concepts contribute to the progress of platform ecosystems within the framework of the development of technical service systems in the PRODISYS funding project. Established systems can be applied in the situation of allocating maintenance tasks while accounting for production plans and stakeholders involved [290]. Condition and process monitoring systems could become part of a holistic, service-oriented business model that establishes a strong bond between component and plant manufacturers and end users. For the actualization of this concept, it is necessary to develop methods for modeling and implementing the interaction of entities that are connected in complex value-creation networks.

8 Anhang

Open Platform Communications Unified Architecture

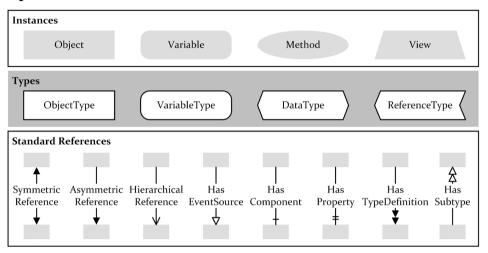


Bild 106: Notationselemente Open Platform Communications Unified Architecture (angelehnt an [160])

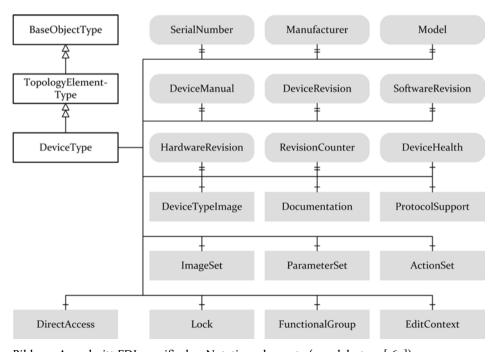


Bild 107: Ausschnitt FDI-spezifischer Notationselemente (angelehnt an [167])

Fundamental Modeling Concepts

In dieser Dissertationsschrift werden die Fundamental Modeling Concepts für die Beschreibung des Gesamtsystems eingesetzt. Die enthaltenen Kompositionsstrukturen beschreiben das Zusammenspiel kollaborierender Systemkomponenten [250, 251].

Tabelle 18: Notationselemente der Fundamental Modeling Concepts (angelehnt an [250, 251])

Notationselement	Beschreibung
A	Aktive Systemkomponente Agent (A) / menschlicher Agent
S	Passive Systemkomponente Speicher (S) / Kanal
\longrightarrow	Gerichtete / ungerichtete Kanten
$A \leftarrow S$	Lesezugriff
$A \longrightarrow S$	Schreibzugriff
AS	Lese- und Schreibzugriff
$A \rightarrow O \rightarrow A$	Unidirektionaler Kommunikationskanal
A — A	Bidirektionaler Kommunikationskanal
A A A	Request-/Response Kommunikationskanal
A	Strukturvarianz

Anwendungsfalldiagramme

Die folgenden Abbildungen fassen die Anwendungsfälle der definierten Systeme im Kontext der vorliegenden Dissertationsschrift zusammen und sind entsprechend der UML 2.5 modelliert [417, 418].

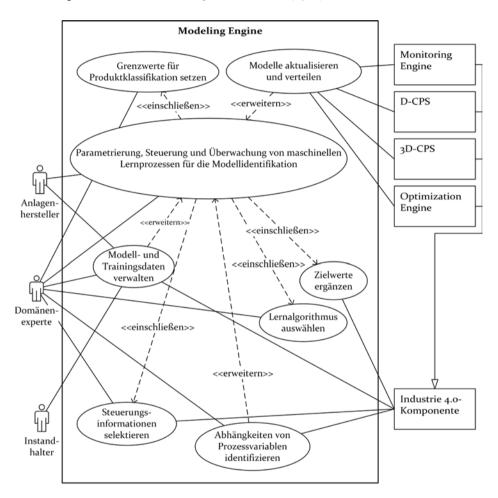


Bild 108: Anwendungsfalldiagramm der Modeling Engine

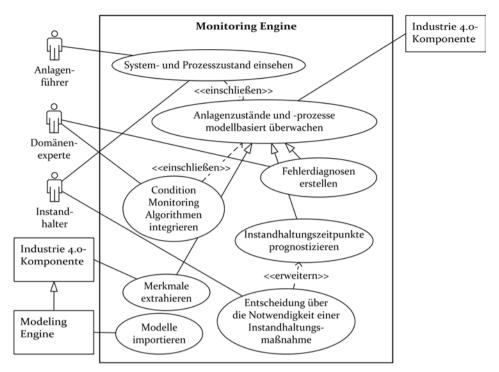


Bild 109: Anwendungsfalldiagramm der Monitoring Engine

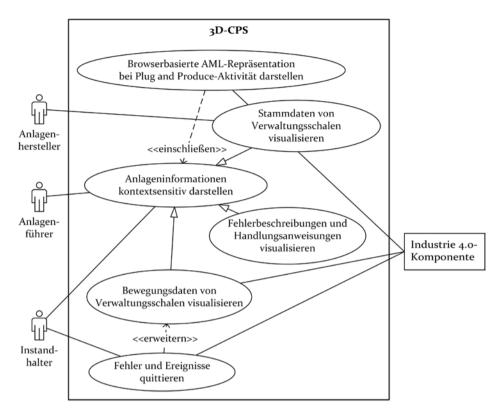


Bild 110: Anwendungsfalldiagramm von 3D-CPS

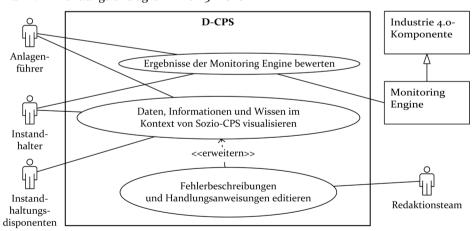


Bild 111: Anwendungsfalldiagramm von D-CPS

Literaturverzeichnis

- [1] BAUERNHANSL, T. Die Vierte Industrielle Revolution Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: T. BAUERNHANSL, M.t. HOMPEL und B. VOGEL-HEUSER, Hg. Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 5-35. ISBN 978-3-658-04681-1
- [2] KAGERMANN, H. Chancen von Industrie 4.0 nutzen. In: T. BAUERNHANSL, M.t. HOMPEL und B. VOGEL-HEUSER, Hg. Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 603-614. ISBN 978-3-658-04681-1
- [3] KAMPKER, A., C. DEUTSKENS und A. MARKS. Die Rolle von lernenden Fabriken für Industrie 4.o. In: A. BOTTHOF und E.A. HARTMANN, Hg. *Zukunft der Arbeit in Industrie 4.o.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015, S. 77-85. ISBN 978-3-662-45914-0
- [4] PLATTFORM INDUSTRIE 4.0. *Memorandum der Plattform Industrie 4.*0. Berlin, 2015
- [5] ACATECH DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSEN-SCHAFTEN E. V. *Cyber-Physical Systems. Innovationsmotor für Mobilität, Gesundheit, Energie und Produktion.* Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. acatech POSITION. 11. ISBN 978-3-642-27567-8
- [6] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE, BUNDESMINISTERIUM DES INNEREN und BUNDESMINISTE-RIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR. Digitale Agenda 2014 - 2017, 2014
- [7] SCHLIEßMANN, A. iProduction, die Mensch-Maschine-Kommunikation in der Smart Factory. In: T. BAUERNHANSL, M.t. HOMPEL und B. VOGEL-HEUSER, Hg. Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 451-480. ISBN 978-3-658-04681-1

- [8] BUTZ, A., M. KOCH und J. SCHLICHTER, Hg. *Mensch und Computer 2014 Workshopband*. Berlin: De Gruyter Oldenbourg, 2014. Mensch & Computer Workshopbände. ISBN 978-3-11-034451-6
- [9] BAUER, W., S. SCHLUND, D. MARRENBACH und
 O. GANSCHAR. *Industrie 4.0 Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland*. Berlin, 2014
- [10] BAUER, K., B. DIEGNER, J. DIEMER, W. DORST, S. FERBER, R. GLATZ, A. HELLINGER, W. HERFS, M. HORSTMANN, T. KAUFMANN, C. KURZ, U. LÖWEN und V. STUMPF. Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. Frankfurt am Main, 2013
- [11] ROTH, A. Industrie 4.0 Hype oder Revolution? In: A. ROTH, Hg. Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0: Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016, S. 1-15. ISBN 978-3-662-48505-7
- [12] BETTENHAUSEN, K. und S. KOWALEWSKI. *Cyber-Physical Systems. Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation.* Düsseldorf, 2013
- [13] JASPERNEITE, J. und O. NIGGEMANN. Systemkomplexität in der Automation beherrschen. Intelligente Assistenzsysteme unterstützen den Menschen. *atp edition Automatisierungstechnische Praxis*, 2012, **54**(9), 36-45
- [14] NIGGEMANN, O. und C. FREY. Data-driven anomaly detection in cyber-physical production systems [online]. *at Automatisie-rungstechnik*, 2015, **63**(10), 821-832. ISSN 2196-677X. Verfügbar unter: doi:10.1515/auto-2015-0060
- [15] KRÜCKHANS, B. und H. MEIER. Industrie 4.0 Handlungsfelder der Digitalen Fabrik zur Optimierung der Ressourceneffizienz in der Produktion. In: W. DANGELMAIER, C. LAROQUE und A. KLAAS, Hg. Simulation in Produktion und Logistik 2013. Paderborn: Heinz Nixdorf Institut Universität Paderborn, 2013, S. 31-40. ISBN 978-3-942647-35-9
- [16] FRANK, U., H. GIESE, F. KLEIN, O. OBERSCHELP, A. SCHMIDT, B. SCHULZ, H. VÖCKING und K. WITTING. Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus. Definitionen und Konzepte, 2004

- [17] GEISBERGER, E. und M. BROY. agendaCPS. Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. acatech STUDIE. 1. ISBN 978-3-642-29098-5
- [18] OBERMAIER, R. *Industrie 4.0 als unternehmerische Gestaltungs-aufgabe.* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016. ISBN 978-3-658-08164-5
- [19] NIGGEMANN, O., J. JASPERNEITE und A. VODENCAREVIC. Konzepte und Anwendungsfälle für die intelligente Fabrik. In: T. BAUERNHANSL, M.t. HOMPEL und B. VOGEL-HEUSER, Hg. Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 173-190. ISBN 978-3-658-04681-1
- [20] SCHACHT, M. und M. NIEMEYER. Entwicklung eines mobilen Shopfloor-Assistenzsystems zur Unterstützung der Instandhaltung im Karosseriebau [online]. S-CPS: Ressourcen-Cockpit für Sozio-Cyber-Physische Systeme. *Abschlussveröffentlichung*, 2017, (1), 153-165. Verfügbar unter: doi:10.14464/awir.v1io.112
- [21] STELZNER, J., S. KOPPITZ, C. NEUBERT und S. WEIß. Einsatz eines Instandhaltungs-Cockpits am Beispiel einer Sondermaschine der Firma Xenon bei Continental Automotive Limbach-Oberfrohna [online]. S-CPS: Ressourcen-Cockpit für Sozio-Cyber-Physische Systeme. *Abschlussveröffentlichung*, 2017, (1), 131-152. Verfügbar unter: doi:10.14464/awir.viio.111
- [22] HOPF, H., M. KRONES und E. MÜLLER. Modellierung und Optimierung von Instandhaltungsprozessen mit Sozio-Cyber-Physischen Systemen [online]. S-CPS: Ressourcen-Cockpit für Sozio-Cyber-Physische Systeme. *Abschlussveröffentlichung*, 2017, (1), 1-22. Verfügbar unter: doi:10.14464/awir.viio.103
- PROFESSUR ARBEITSWISSENSCHAFT UND INNOVATIONS-MANAGEMENT, TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ.

 S-CPS | Forschungsprojekt "Ressourcen-Cockpit für Sozio-Cyber-Physische Systeme" [online] [Zugriff am: 13. Oktober 2015].

 Verfügbar unter:
 https://www.tu-chemnitz.de/mb/ArbeitsWiss/s-cps/

- [24] REIDT, A. und H. KRCMAR. Referenzarchitektur für Cyber-physische Systeme zur Unterstützung der Instandhaltung. In: *Multikonferenz Wirtschaftsinformatik (MKWI)* 2016: Universitätsverlag Ilmenau, 2016, S. 377-388
- [25] MAYER, F. und D. PANTFÖRDER. Unterstützung des Menschen in Cyber-Physical-Production-Systems. In: T. BAUERNHANSL, M.t. HOMPEL und B. VOGEL-HEUSER, Hg. Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 481-491. ISBN 978-3-658-04681-1
- [26] MANZEI, C., L. SCHLEUPNER und R. HEINZE, Hg. Industrie 4.0 im internationalen Kontext. Kernkonzepte, Ergebnisse, Trends.
 2. Auflage. Berlin: VDE Verlag GmbH; Beuth Verlag, 2017. ISBN 978-3-8007-4336-0
- [27] BRÜHL, V. Wirtschaft des 21. Jahrhunderts. Herausforderungen in der Hightech-Ökonomie. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. ISBN 978-3-658-04882-2
- [28] SIEPMANN, D. und N. GRÄF. Industrie 4.0 Grundlagen und Gesamtzusammenhang. In: A. ROTH, Hg. Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0: Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016, S. 17-82. ISBN 978-3-662-48505-7
- [29] STRUNZ, M. *Instandhaltung*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. ISBN 978-3-642-27389-6
- [30] SCHOTT, P., M. LEDERER, M. KHOMUT, S. AHLERS, M. BOCK und F. BODENDORF. Lösungswissen Industrie 4.0: Eine reifegradorientierte Beschreibungsvorschrift technischer Lösungsprinzipien zur Komplexitätsbeherrschung in bestehenden Produktionssystemen, 2017
- [31] SCHOTT, P., M. LEDERER, S. NIEDERMAIER, F. BODENDORF und M. HAFNER. A Maturity Model to Organize the Multi-dimensionality of Digitalization in Smart Factories. In: J. WANG, Ö. FARUK YILMAZ und S. TÜFEKÇİ, Hg. Handbook of Research on Applied Optimization Methodologies in Manufacturing Systems: IGI Global, 2018, S. 354-374

- [32] BINZ, H., B. BERTSCHE, W. BAUER, D. SPATH und D. ROTH, Hg. *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP):* Universität Stuttgart, 2017
- [33] DENGEL, A., Hg. Semantische Technologien. Grundlagen -Konzepte - Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. ISBN 978-3-8274-2663-5
- [34] ACATECH DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSEN-SCHAFTEN E. V. Smart Maintenance für Smart Factories. Mit intelligenter Instandhaltung die Industrie 4.0 vorantreiben. München: Utz, 2015. acatech POSITION. ISBN 978-3-8316-4493-3
- [35] KERSTEN, W., H. KOLLER und H. LÖDDING, Hg. Industrie 4.0: Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern. Berlin: Gito, 2014. Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. (HAB). ISBN 978-3-95545-083-0
- [36] BROY, M., M.V. CENGARLE und E. GEISBERGER. Cyber-Physical Systems: Imminent Challenges. In: R. CALINESCU und D. GARLAN, Hg. *Large-Scale Complex IT Systems. Development, Operation and Management*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012, S. 1-28. ISBN 978-3-642-34058-1
- [37] REIDT, A., M. DUCHON und H. KRCMAR. Referenzarchitektur eines Ressourcen-Cockpits zur Unterstützung der Instandhaltung. München: fortiss GmbH, 2016. ISBN 978-3-9818237-1-4
- [38] PFLAUM, A., C. HOHMANN, B. HOFMANN, J. BOPPERT und C. KLÖTZER. Kurzstudie Industrie 4.0 und CPS Bedarfe und Lösungen aus Sicht des Mittelstands. München, 2014
- [39] ANDERL, R., J. DEUSE, M. DÖRING, M. FUNK, F. HEINZE, A. HENGSTEBECK, L. JÄNICKE, R. KETTNER, T. KOSCH, B. KUHLENKÖTTER, J. ROßMANN, A. SCHMIDT, G. TSCHIRNER-VINKE, M. TUNK, C. ULRICH und I. SEIFERT. Softwarearchitekturen für Industrie 4.0. RAMI und IIRA aus Sicht der Projekte im Technologieprogramm AUTONOMIK für Industrie 4.0. Berlin, 2016
- [40] DIETEL, M.E., S. HEYER, H.-J. LÄPKE, N. MACKE, D. RICHTER, V. SCHIEK und R. TRINTER. Industrie 4.0 Die Bedeutung von Interoperabilität im Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0). Leitfaden. Berlin, 2017

- [41] GIVEHCHI, O., K. LANDSDORF, P. SIMOENS und A.W. COLOMBO. Interoperability for Industrial Cyber-Physical Systems: An Approach for Legacy Systems [online]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 3370-3378. ISSN 1551-3203. Verfügbar unter: doi:10.1109/TII.2017.2740434
- [42] KOWALEWSKI, S., B. RUMPE und A. STOLLENWERK. Cyber-Physical Systems eine Herausforderung an die Automatisierungstechnik? In: VDI-VERLAG, Hg. *Proceedings Automation*, 2012, S. 113-116
- [43] BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG. Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen. Bonn, 2014
- [44] KOLBERG, D. Entwicklung einer Referenzarchitektur zur Realisierung von Methoden der Lean Production mittels digitaler Technologien. Technische Universität Kaiserslautern, 2018
- [45] RAUCH, E. Konzept eines wandlungsfähigen und modularen Produktionssystems für Franchising-Modelle: Universitätsbibliothek der Universität Stuttgart, 2013. Schriftenreihe zu Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement. 9. ISBN 978-3-8396-0585-1
- [46] Verein Deutscher Ingenieure; Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik. VDI/VDE 2182, *Informationssicherheit in der industriellen Automatisierung*. Berlin: Beuth Verlag
- [47] International Organization for Standardization. ISO 13374-3:2015-12, Condition monitoring and diagnostics of machine systems Data processing, communication and presentation Part 4: Presentation. Berlin: Beuth Verlag
- [48] International Organization for Standardization.
 ISO 13374-1:2003-03, Condition monitoring and diagnostics of machines Data processing, communication and presentation Part 1: General guidelines. Berlin: Beuth Verlag
- [49] International Organization for Standardization.
 ISO 13374-2:2007-07, Condition monitoring and diagnostics of machines Data processing, communication and presentation Part 2: Data processing. Berlin: Beuth Verlag

- [50] International Organization for Standardization.
 ISO 13374-3:2012-02, Condition monitoring and diagnostics of machines Data processing, communication and presentation Part 3: Communication. Berlin: Beuth Verlag
- [51] BITKOM E. V., VDMA E.V. und ZVEI E.V. Umsetzungsstrategie Industrie 4.0. Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0. Berlin, 2015
- [52] GRAF, U., R. HEIDEL, G. KADEL, B. KÄRCHER, F. MILDNER, D. SCHULZ und D. TENHAGEN. *Netzkommunikation für Industrie 4.0 Diskussionspapier*. Berlin, 2016
- [53] LEE, E.A. The Past, Present and Future of Cyber-Physical Systems: A Focus on Models [online]. *Sensors*, 2015, **15**(3), 4837-4869. Verfügbar unter: doi:10.3390/s150304837
- [54] ISERMANN, R. Fault-Diagnosis Applications. Model-Based Condition Monitoring: Actuators, Drives, Machinery, Plants, Sensors, and Fault-tolerant Systems. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. ISBN 978-3-642-12766-3
- [55] VODENČAREVIĆ, A., A. MAIER und O. NIGGEMANN. Evaluating Learning Algorithms for Stochastic Finite Automata. Comparative Empirical Analyses on Learning Models for Technical Systems. In: M. de MARSICO und A.L.N. FRED, Hg. International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods (ICPRAM): SciTePress, 2013, S. 229-238. ISBN 978-989-8565-41-9
- [56] FUNK, B. Geschäftsprozessintegration mit SAP. Fallstudien zur Steuerung von Wertschöpfungsprozessen entlang der Supply Chain. Berlin: Springer, 2010. ISBN 978-3-642-12720-5
- [57] NIGGEMANN, O., G. BISWAS, J.S. KINNEBREW, H. KHORASGANI, S. VOLGMANN und A. BUNTE. Data-Driven Monitoring of Cyber-Physical Systems Leveraging on Big Data and the Internet-of-Things for Diagnosis and Control. In: International Workshop on Principles of Diagnosis (DX), 2015
- [58] BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG. Industrie 4.0 [online]. Innovationen für die Produktion von morgen, 2015 [Zugriff am: 9. April 2015]. Verfügbar unter: http://www.bmbf.de/de/9072.php

- [59] OKS, S.J., A. FRITZSCHE und K.M. MÖSLEIN. Rollen, Views und Schnittstellen Implikationen zur stakeholderzentrierten Entwicklung Sozio-Cyber-Physischer Systeme [online]. S-CPS: Ressourcen-Cockpit für Sozio-Cyber-Physische Systeme. *Abschlussveröffentlichung*, 2017, (1), 61-80. Verfügbar unter: doi:10.14464/awir.viio.107
- [60] HIRSCH-KREINSEN, H. und J. WEYER. Wandel von Produktionsarbeit "Industrie 4.0" [online]. Soziologische Arbeitspapiere, 2014, (38). Verfügbar unter: http://www.wiwi.tu-dortmund.de/wiwi/ts/de/forschung/veroeff/soz_arbeitspapiere/AP-SOZ-38.pdf
- [61] GORECKY, D., M. SCHMITT und M. LOSKYLL. Mensch-Maschine-Interaktion im Industrie 4.0-Zeitalter. In: T. BAUERN-HANSL, M.t. HOMPEL und B. VOGEL-HEUSER, Hg. Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 525-542. ISBN 978-3-658-04681-1
- [62] BAUERNHANSL, T., J. KRÜGER, G. REINHART und G. SCHUH. WGP-Standpunkt Industrie 4.0. Darmstadt, 2016
- [63] LUCKE, D., D. GÖRZIG, M. KACIR, J. VOLKMANN, C. HAIST, M. SACHSENMAIER und H. RENTSCHLER. *STRUKTURSTUDIE* "INDUSTRIE 4.0 FÜR BADEN-WÜRTTEMBERG". Baden-Württemberg auf dem Weg zu Industrie 4.0. Stuttgart, 2014
- [64] PEISSNER, M. und C. HIPP. Potenziale der Mensch-Technik-Interaktion für die effiziente und vernetzte Produktion von morgen. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2013. ISBN 978-3-8396-0563-9
- [65] VOGEL, O., I. ARNOLD, A. CHUGHTAI, E. IHLER, T. KEHRER, U. MEHLIG und U. ZDUN. *Software-Architektur. Grundlagen Konzepte Praxis.* 2. Auflage. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2009. ISBN 978-3-8274-2267-5
- [66] KRUCHTEN, P.B. The 4+1 View Model of Architecture [online]. *IEEE Software*, 1995, **12**(6), 42-50. ISSN 0740-7459. Verfügbar unter: doi:10.1109/52.469759
- [67] ROLAND BERGER STRATEGY CONSULTANTS GMBH und BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN INDUSTRIE E.V. Die Digitale Transformation der Industrie. Was sie bedeutet. Wer gewinnt. Was jetzt zu tun ist. München, 2015

- [68] SCHMIDT, E. und J. COHEN. *The New Digital Age. Reshaping the Future of People, Nations and Business*. New York: Knopf, 2013. ISBN 978-0-30795-713-9
- [69] VAN TILBURG, M. Die eigentliche digitale Revolution Neue Geschäftsmodelle statt (nur) neue Kommunikation [online].

 Marketing Review St. Gallen, 2014, 31(1), 94-105. Verfügbar unter: doi:10.1365/s11621-014-0324-4
- [70] DAIS, S. Industrie 4.0 Anstoß, Vision, Vorgehen. In: T. BAUERNHANSL, M. ten HOMPEL und B. VOGEL-HEUSER, Hg. *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik.* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, S. 625-634. ISBN 978-3-658-04681-1
- [71] SENDLER, U., Hg. *Industrie 4.o. Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM.* Berlin: Springer Vieweg, 2013. Xpert.press. ISBN 978-3-642-36916-2
- [72] BACH, N., W. BUCHHOLZ und B. EICHLER. Geschäftsmodelle für Wertschöpfungsnetzwerke. Wilfried Krüger zum 60. Geburtstag. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2003. ISBN 3-409-12315-6
- [73] SINZ, E.J. Dienstorientierte IT-Systeme für hochflexible Geschäftsprozesse. Bamberg: University of Bamberg Press, 2011. Schriften aus der Fakultät Wirtschaftsinformatik und Angewandte Informatik der Otto-Friedrich-Universität Bamberg. 9. ISBN 978-3-86309-009-8
- [74] DORST, W. und T. HEYER. *Industrie 4.0 Deutschland als Vorreiter der digitalisierten Vernetzung von Produkten und Produktionsprozessen.* Berlin, 2015. Politische Handlungsempfehlungen
- [75] SPATH, D., O. GANSCHAR, S. GERLACH, M. HÄMMERLE, T. KRAUSE und S. SCHLUND. *Produktionsarbeit der Zukunft Industrie 4.o.* Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2013
- [76] DRATH, R. und A. HORCH. Industrie 4.0 [online]. Hit or Hype? *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2014, **8**(2), 56-58. Verfügbar unter: doi:10.1109/MIE.2014.2312079
- [77] KAGERMANN, H., W. WAHLSTER und J. HELBIG. *Im Fokus:*Das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Bericht der Promotorengruppe
 Kommunikation. Frankfurt am Main, 2012

- [78] SCHWAB, K. *Die Vierte Industrielle Revolution.* 4. Auflage. München: Pantheon, 2016. ISBN 978-3-570-55345-9
- [79] SCHÖNFELDER, C. Industrie 1.0 bis 3.0. In: C. SCHÖNFELDER, Hg. *Muße Garant für unternehmerischen Erfolg.* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018, S. 7-38. ISBN 978-3-658-17523-8
- [80] KUSCH, R., B. MALIK, W. GREBNER und V. SASERKLAR. Industrie 4.0 und Digitalisierung. Allgemeines Verständnis, aktuelle Trends und Anwendungsbereiche. Hofer Akademische Schriften, 2017, (16)
- [81] SCHENK, M. Instandhaltung technischer Systeme. Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. ISBN 978-3-642-03948-5
- [82] HOFSTÄDTER, K. und SIEMENS AG. *Industrie 4.0 Eine Vision auf dem Weg zur Wirklichkeit* [online]. 2013
 [Zugriff am: 2. September 2017]. Verfügbar unter: http://www.centers-of-competence-ev.info/neu/wp-content/up-loads/2014/07/03-August_SIEMENS-AG.pdf
- [83] DUMITRESCU, R., J. GAUSEMEIER, A. KÜHN, M. LUCKEY, C. PLASS, M. SCHNEIDER und T. WESTERMANN. Auf dem Weg zur Industrie 4.0: Erfolgsfaktor Referenzarchitektur [online], 2015 [Zugriff am: 3. Februar 2016]. Verfügbar unter: http://www.its-owl.de/fileadmin/PDF/Informationsmaterialien/2015-Auf-dem-Weg-zu-Industrie_4.0-Erfolgsfaktor-Referenzarchitektur.pdf
- [84] OTTO, B., J. JÜRJENS, J. SCHON, S. AUER, N. MENZ, S. WENZEL und J. CIRULLIES. *Industrial Data Space. Digitale Souveränität über Daten.* München, 2016
- [85] SCHLICK, J., P. STEPHAN, M. LOSKYLL und D. LAPPE. Industrie 4.0 in der praktischen Anwendung. In: T. BAUERNHANSL, M.t. HOMPEL und B. VOGEL-HEUSER, Hg. *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration.* Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 57-84. ISBN 978-3-658-04681-1
- [86] RIEMENSPERGER, F. Industrie 4.0 wie Sensoren, Big Data und 3D-Druck die Produktion und die Arbeit in der Fabrik verändern. Berlin, 2016

- [87] BAUERNHANSL, T., M.t. HOMPEL und B. VOGEL-HEUSER, Hg. Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik.

 Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. ISBN 978-3-658-04681-1
- [88] International Electrotechnical Commission. IEC 62264-1:2013, Enterprise-control system integration
- [89] HARJUNKOSKI, I., R. NYSTRÖM und A. HORCH. Integration of scheduling and control Theory or practice? [online]. *Computers & Chemical Engineering*, 2009, 33(12), 1909-1918. ISSN 0098-1354. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.compchemeng.2009.06.016
- [90] MERSCH, H., M. SCHLUTTER und U. EPPLE. Classifying Services for the Automation Environment. In: *IEEE International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation* (ETFA), 2010, S. 1-7. ISBN 978-1-4244-6848-5
- [91] WOLLERT, J. Industrie 4.0 warten bis die Revolution vorbei ist? Ängste und Chance rund um Industrie 4.0. In:
 J. JASPERNEITE und V. LOHWEG, Hg. Kommunikation und Bildverarbeitung in der Automation. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2018, S. 177-186. ISBN 978-3-662-55231-5
- [92] PIGAN, R. und M. METTER. Automatisieren mit PROFINET.
 Industrielle Kommunikation auf Basis von Industrial Ethernet.
 2. Auflage. Erlangen: Publicis Publishing, 2008.
 ISBN 978-3-89578-293-0
- [93] VOGEL-HEUSER, B. Herausforderungen und Anforderungen aus Sicht der IT und der Automatisierungstechnik. In:
 T. BAUERNHANSL, M.t. HOMPEL und B. VOGEL-HEUSER, Hg. Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik.
 Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 37-48. ISBN 978-3-658-04681-1
- [94] WILLIG, A. An Architecture for Wireless Extension of PROFIBUS. In: *IEEE Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, 2003, S. 2369-2375. ISBN 978-0-7803-7906-0

- [95] BRETTEL, M., N. FRIEDERICHSEN, M. KELLER und M. ROSENBERG. How Virtualization, Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective. International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering, 2014, 8(1), 37-44
- [96] VOGEL-HEUSER, B., C. DIEDRICH, D. PANTFÖRDER und P. GOHNER. Coupling heterogeneous production systems by a multi-agent based cyber-physical production system. In: *IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2014, S. 713-719. ISBN 978-1-4799-4905-2
- [97] BAUERNHANSL, T., M. ten HOMPEL und B. VOGEL-HEUSER, Hg. Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. ISBN 978-3-658-04681-1
- [98] ROTH, A., Hg. Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0: Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis.
 Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016.
 ISBN 978-3-662-48505-7
- [99] ERL, T. Service-Oriented Architecture. Concepts, Technology, and Design. 5. Auflage: Prentice-Hall, 2006. ISBN 0-13-185858-0
- [100] HUMM, B., M. VOß und A. HESS. Regeln für serviceorientierte Architekturen hoher Qualität [online]. *Informatik Spektrum*, 2006, **29**(6), 395-411. ISSN 0170-6012. Verfügbar unter: doi:10.1007/s00287-006-0099-3
- [101] WILDE, N., B. GONEN, E. EL-SHEIKH und A. ZIMMERMANN. Approaches to the Evolution of SOA Systems. In: E. EL-SHEIKH, A. ZIMMERMANN und L.C. JAIN, Hg. *Emerging Trends in the Evolution of Service-Oriented and Enterprise Architectures*. Cham: Springer International Publishing, 2016, S. 5-21. ISBN 978-3-319-40564-3
- [102] DÜRKOP, L., Hg. *Automatische Konfiguration von Echtzeit-Ethernet*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017. ISBN 978-3-662-54124-1

- [103] DÜRKOP, L. und J. JASPERNEITE. "Plug & Produce" als Anwendungsfall von Industrie 4.0. In: B. VOGEL-HEUSER,
 T. BAUERNHANSL und M. ten HOMPEL, Hg. *Handbuch Industrie 4.0 Bd.2.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2017, S. 59-71. ISBN 978-3-662-53247-8
- [104] VOGEL-HEUSER, B. und S. KOWALEWSKI. Cyber-physische Systeme [online]. *at Automatisierungstechnik*, 2013, **61**(10). ISSN 0178-2312. Verfügbar unter: doi:10.1515/auto.2013.9010
- [105] LUNZE, J. Vernetzte Regelungen aus der Sicht der Theorie komplexer Netzwerke [online]. *at Automatisierungstechnik*, 2013, **61**(10), 700-710. ISSN 0178-2312. Verfügbar unter: doi:10.1515/auto.2013.1029
- [106] LEE, E.A. Cyber-Physical Systems Are Computing Foundations Adequate? NSF Workshop On Cyber-Physical Systems: Research Motivation, Techniques and Roadmap. Electrical Engineering and Computer Sciences Department, University of California, Berkeley, 2016
- [107] WEDDE, R.F., S. LEHNHOFF, C. REHTANZ und O. KRAUSE. Von eingebetteten Systemen zu Cyber-Physical Systems. In: W.A. HALANG und P. HOLLECZEK, Hg. Aktuelle Anwendungen in Technik und Wirtschaft. Fachtagung des GI/GMA-Fachausschusses Echtzeitsysteme 2008. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009, S. 21-30. ISBN 978-3-540-85323-7
- [108] MEYER, G.G., K. FRÄMLING und J. HOLMSTRÖM. Intelligent Products: A survey [online]. *Computers in Industry*, 2009, **6o**(3), 137-148. ISSN 0166-3615. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.compind.2008.12.005
- [109] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE. I4.0-Sprache. Vokabular, Nachrichtenstruktur und semantische Interaktionsprotokolle der I4.0-Sprache. Berlin, 2018
- [110] LEE, E.A. und S.A. SESHIA. *Introduction to Embedded Systems. A Cyber-Physical Systems Approach.* 2. Auflage. Cambridge: MIT Press, 2017. ISBN 978-0-262-53381-2

- [111] GAUSEMEIER, J., H. ANACKER, A. CZAJA und H. WAßMANN. Auf dem Weg zu intelligenten technischen Systemen. In: J. GAUSEMEIER, Hg. Entwurf mechatronischer Systeme. Grundlagen, Methoden und Werkzeuge, Adaption, Selbstoptimierung und Verlässlichkeit, Integration Mechanik und Elektronik, Miniaturisierung. Paderborn, 2013, S. 11-50. ISBN 978-3-942647-29-8
- [112] WEISER, M. The computer for the 21st century [online]. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 1999, **3**(3), 3-11. ISSN 1559-1662. Verfügbar unter: doi:10.1145/329124.329126
- [113] LUNZE, J. Automatisierungstechnik. Methoden für die Überwachung und Steuerung kontinuierlicher und ereignisdiskreter Systeme. 4. Auflage. Berlin: De Gruyter Oldenbourg, 2016. De Gruyter Studium. ISBN 978-3-11-046557-0
- [114] HENZINGER, T.A. The Theory of Hybrid Automata. In: M.K. INAN und R.P. KURSHAN, Hg. *Verification of Digital and Hybrid Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000, S. 265-292. ISBN 978-3-642-59615-5
- [115] VODENČAREVIĆ, A. *Identifying Behavior Models for Hybrid Production Systems.* Universität Paderborn, 2013
- [116] WINDMANN, S. und O. NIGGEMANN. Efficient Fault Detection for Industrial Automation Processes with Observable Process Variables. In: *IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2015, S. 121-126. ISBN 978-1-4799-6650-9
- [117] MAIER, A. Identification of Timed Behavior Models for Diagnosis in Production Systems. Universität Paderborn, 2014
- [118] HOPCROFT, J.E. und J.D. ULLMAN. *Einführung in die Automatentheorie, formale Sprachen und Komplexitätstheorie.* Bonn: Addison-Wesley, 1990. Internationale Computer-Bibliothek. ISBN 3-89319-181-X
- [119] LYNCH, N., R. SEGALA und F. VAANDRAGER. Hybrid I/O automata [online]. *Information and Computation*, 2003, **185**(1), 105-157. ISSN 08905401. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0890-5401(03)00067-1

- [120] BERA, D., K. VAN HEE und H. NIJMEIJER. Modeling Hybrid Systems with Petri Nets. In: M.S. OBAIDAT, T. ÖREN, J. KACPRZYK und J. FILIPE, Hg. *Simulation and Modeling Methodologies*, *Technologies and Applications*. Cham: Springer International Publishing, 2015, S. 17-42. ISBN 978-3-319-26469-1
- [121] GARCIA, E., F. MORANT, V. MASCAROS, E. QUILES und A. CORRECHER. PNPACDA, Petri Nets with Places Associated to Continuous or Discretized Control Algorithms for Hybrid Systems Modelling. In: *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2003, S. 718-722
- [122] BORUTZKY, W. Bond Graph Model-based Fault Diagnosis of Hybrid Systems. Cham: Springer International Publishing, 2015. ISBN 978-3-319-11859-8
- [123] ROYCHOUDHURY, I., M.J. DAIGLE, G. BISWAS und X. KOUTSOUKOS. Efficient simulation of hybrid systems [online]. A hybrid bond graph approach. *SIMULATION*, 2010, 87(6), 467-498. ISSN 0037-5497. Verfügbar unter: doi:10.1177/0037549710364478
- [124] MONOSTORI, L. Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges [online]. *Procedia CIRP*, 2014, 17, 9-13. ISSN 2212-8271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2014.03.115
- [125] LOSKYLL, M. und J. SCHLICK. Cyber-Physische Produktionssysteme [online]. Dynamische Orchestrierung mechatronischer Feldgerätefunktionen. *at Automatisierungstechnik*, 2013, **61**(10). ISSN 0178-2312. Verfügbar unter: doi:10.1515/auto.2013.0060
- [126] JOSUTTIS, N.M. SOA in der Praxis. System-Design für verteilte Geschäftsprozesse. Heidelberg: dpunkt.verlag, 2015. ISBN 978-3-89864-476-1
- [127] RUDTSCH, V., J. GAUSEMEIER, J. GESING, T. MITTAG und S. PETER. Pattern-based Business Model Development for Cyber-Physical Production Systems [online]. *Procedia CIRP*, 2014, 25, 313-319. ISSN 2212-8271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2014.10.044

- [128] NAUMANN, M., K. WEGENER und R.D. SCHRAFT. Control Architecture for Robot Cells to Enable PlugʻnʻProduce. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2007, S. 287-292. ISBN 978-3-03719-062-3
- [129] ARAI, T., Y. AIYAMA, Y. MAEDA, M. SUGI und J. OTA. Agile Assembly System by "Plug and Produce" [online]. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 2000, 49(1), 1-4. ISSN 0007-8506. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0007-8506(07)62883-2
- [130] PAPENFORT, J., U. FRANK und S. STRUGHOLD. Integration von IT in die Automatisierungstechnik [online]. *Informatik Spektrum*, 2015, **38**(3), 199-210. ISSN 0170-6012. Verfügbar unter: doi:10.1007/s00287-015-0879-8
- [131] ADOLPHS, P., H. BEDENBENDER, D. DIRZUS, M. EHLICH, U. EPPLE, M. HANKEL, R. HEIDEL, M. HOFFMEISTER, H. HUHLE, B. KÄRCHER, H. KOZIOLEK, R. PICHLER, S. POLLMEIER, F. SCHEWE, A. WALTER, B. WASER und M. WOLLSCHLÄGER. Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0). Statusreport. Düsseldorf, 2015
- [132] BAHETI, R. und H. GILL. *Cyber-physical Systems* [online], 2011 [Zugriff am: 10. August 2018]. Verfügbar unter: http://ieeecss.org/sites/ieeecss.org/files/documents/IoCT-Part3-o2CyberphysicalSystems.pdf
- [133] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN SPEC 91345, Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0)
- [134] HEIDEL, R., M. HOFFMEISTER, M. HANKEL und U. DÖBRICH. Basiswissen RAMI 4.0. Referenzarchitekturmodell mit Industrie 4.0-Komponente. Berlin: VDE Verlag; Beuth Verlag, 2017. ISBN 978-3-41026-483-5
- [135] USLAR, M. und D. ENGEL. Towards Generic Domain Reference Designation: How to learn from Smart Grid Interoperability. In: *Poster Proceedings of DACH Energy Informatics*, 2015, S. 1-12. ISBN 978-3-319-25876-8
- [136] SCHLEIPEN, M., Hg. *Praxishandbuch OPC UA. Grundlagen Implementierung Nachrüstung Praxisbeispiele.* Würzburg: Vogel Business Media, 2018. ISBN 978-3-8343-3413-8

- [137] International Electrotechnical Commission. IEC 62890:2013, Lifecycle management for systems and products used in industrialprocess measurement, control and automation
- [138] International Electrotechnical Commission. IEC 61512:1997, Batch control
- [139] BOCK, J., C. DIEDRICH, R. HÄNISCH, A. KRAFT, J. NEIDIG, O. NIGGEMANN, F. PETHIG, J. REICH, T. SCHULZ, F. VOLLMAR und J. VIALKOWITSCH. Weiterentwicklung des Interaktionsmodells für Industrie 4.0-Komponenten. Berlin, 2016
- [140] FLATT, H., S. SCHRIEGEL, J. JASPERNEITE, H. TRSEK und H. ADAMCZYK. Analysis of the Cyber-Security of Industry 4.0 Technologies based on RAMI 4.0 and Identification of Requirements. In: *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 2016, S. 1-4
- [141] HILGENDORF, E. und U. SEIDEL. Juristische Herausforderungen für digitale Wertschöpfung strukturierte Lösungswege für KMU. Begleitforschung AUTONOMIK für Industrie 4.0, 2016
- [142] HÜBNER, I. ZVEI: RAMI 4.0 next steps und das IIRA des IIC im Vergleich [online], 2015 [Zugriff am: 23. September 2017]. Verfügbar unter: http://www.openautomation.de/detailseite/zvei-rami-40-next-steps-und-das-iira-des-iic-im-vergleich.html
- [143] INDUSTRIAL INTERNET CONSORTIUM. Industrial Internet Reference Architecture. Volume G1: Reference Architecture, 2017
- [144] WEYRICH, M. und C. EBERT. Reference Architectures for the Internet of Things [online]. *IEEE Software*, 2016, 33(1), 112-116. ISSN 0740-7459. Verfügbar unter: doi:10.1109/MS.2016.20
- [145] GRANGEL-GONZÁLEZ, I., L. HALILAJ, G. COSKUN, S. AUER, D. COLLARANA und M. HOFFMEISTER. Towards a Semantic Administrative Shell for Industry 4.0 Components. In: *IEEE International Conference on Semantic Computing (ICSC)*, 2016, S. 230-237. ISBN 978-1-5090-0662-5
- [146] VDI/VDE GESELLSCHAFT MESS- UND AUTOMATISIERUNGS-TECHNIK. Industrie 4.0 Statusreport. Gegenstände, Entitäten, Komponenten. Düsseldorf, 2014

- [147] PLATTFORM INDUSTRIE 4.0. Struktur der Verwaltungsschale. Fortentwicklung des Referenzmodells für die Industrie 4.0-Komponente. Berlin, 2016
- [148] ZVEI ZENTRALVERBAND ELEKTROTECHNIK- UND ELEKT-RONIKINDUSTRIE E. V. Beispiele zur Verwaltungsschale der Industrie 4.0-Komponente Basisteil. Fortentwicklung des Referenzmodells für die Industrie 4.0-Komponente. Frankfurt am Main, 2016
- [149] DIEDRICH, C., A. BIELIAIEV, J. BOCK, A. GÖSSLING, R. HÄNISCH, A. KRAFT, F. PETHIG, O. NIGGEMANN, J. REICH, F. VOLLMAR und J. WENDE. Interaktionsmodell für Industrie 4.0 Komponenten [online]. at Automatisierungstechnik, 2017, 65(1). ISSN 2196-677X. Verfügbar unter: doi:10.1515/auto-2016-0118
- [150] EPPLE, U., F. PALM und M. AZARMIPOUR. *ProMo: Property Meta Model. Basic Concepts for openAAS.* Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Lehrstuhl für Prozessleittechnik, 2016
- [151] RHEINISCH-WESTFÄLISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE AACHEN, LEHRSTUHL FÜR PROZESSLEITTECHNIK. openAAS [online]. Development Repository for open Asset Administration Shell [Zugriff am: 17. September 2017]. Verfügbar unter: http://acplt.github.io/openAAS/
- [152] OPENAUTOMATION.DE. "openAAS": Erster Meilenstein gesetzt [online], 2016 [Zugriff am: 27. April 2017]. Verfügbar unter: http://www.openautomation.de/detailseite/openaas-erster-meilenstein-gesetzt.html
- [153] SCHLECHTENDAHL, J., M. KEINERT, F. KRETSCHMER, A. LECHLER und A. VERL. Making existing production systems Industry 4.0-ready [online]. Holistic approach to the integration of existing production systems in Industry 4.0 environments. Production Engineering, 2015, 9(1), 143-148. ISSN 0944-6524. Verfügbar unter: doi:10.1007/S11740-014-0586-3
- [154] GRAUBE, M., J. PFEFFER, J. ZIEGLER und L. URBAS. Linked Data as integrating technology for industrial data. In: *IEEE International Conference on Network-Based Information Systems* (NBIS), 2011, S. 162-167. ISBN 978-1-4577-0789-6

- [155] HANNELIUS, T., M. SALMENPERÄ und S. KUIKKA. Roadmap to adopting OPC UA. In: *IEEE International Conference on Indust*rial Informatics (INDIN), 2008, S. 756-761. ISBN 978-1-4244-2170-1
- [156] ROHJANS, S., M. USLAR und H.-J. APPELRATH. OPC UA and CIM: Semantics for the Smart Grid. In: *IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition (PES)*, 2010, S. 1-8. ISBN 978-1-4244-6546-0
- [157] BLUMAUER, A., T. PELLEGRINI und S. PASCHKE. Corporate Semantic Web – der Einsatz von Semantic-Web-Technologien im Unternehmen. *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik*, 2010, 47(5), 105-114
- [158] HITZLER, P., M. KRÖTZSCH, S. RUDOLPH und Y. SURE. Semantic Web. Grundlagen. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. ISBN 978-3-540-33993-9
- [159] PELLEGRINI, T. und A. BLUMAUER. Semantic Web. Wege zur vernetzten Wissensgesellschaft. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. ISBN 978-3-540-29324-8
- [160] DAMM, M., S.-H. LEITNER und W. MAHNKE. *OPC Unified Architecture*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. ISBN 978-3-540-68898-3
- [161] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN EN 62541-10, *OPC Unified Architecture*
- [162] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN EN 62541-11, *OPC Unified Architecture*
- [163] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN EN 62541-9, *OPC Unified Architecture*
- [164] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN EN 62541-8, *OPC Unified Architecture*
- [165] GROßMANN, D. und S. SEINTSCH. FDI und OPC UA. Grundsteine von Industrie 4.o. *atp edition*, 2016, (1-2), 34-39
- [166] ONO, T., S. ALI, P. HUNKAR und D. BRANDL. *OPC Unified Architecture for ISA-95 Common Object Model. Companion Specification Release* 1.00, 2013

- [167] GROßMANN, D., M. BRAUN, B. DANZER und M. RIEDL. Field Device Integration. Handbuch für die einheitliche Integrationstechnologie. Berlin: VDE Verlag, 2013. ISBN 978-3-8007-3513-6
- [168] OBERMAIER, D., C. GÖTZ, K. EDLER und F. PIRCHNER. *MQTT* im IoT: Einstieg in die M2M-Kommunikation: Bookwire, 2014. shortcuts. v.123. ISBN 978-3-86802-519-4
- [169] SCHLEIPEN, M., S.-S. GILANI, T. BISCHOFF und J. PFROMMER. OPC UA & Industrie 4.0 enabling technology with high diversity and variability [online]. *Procedia CIRP*, 2016, 57, 315-320. ISSN 2212-8271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2016.11.055
- [170] OPC FOUNDATION. OPC Unified Architecture Specification Part 14: PubSub Release Candidate 1.04.24, 2017
- [171] LANGE, J., T.J. BURKE und F. IWANITZ. *OPC. Von Data Access bis Unified Architecture.* 5. Auflage. Berlin: VDE Verlag, 2014. ISBN 978-3-8007-3506-8
- [172] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN EN 62714-1,

 Datenaustauschformat für Planungsdaten industrieller Automatisierungssysteme Automation markup language. Berlin: Beuth
 Verlag
- [173] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN EN 62714-2, Datenaustauschformat für Planungsdaten industrieller Automatisierungssysteme - Automation markup language. Berlin: Beuth Verlag
- [174] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN EN 62714-3,

 Datenaustauschformat für Planungsdaten industrieller Automatisierungssysteme Automation markup language. Berlin: Beuth
 Verlag
- [175] SCHLEIPEN, M. Adaptivität und semantische Interoperabilität von Manufacturing Execution Systemen (MES). Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2013. Karlsruher Schriften zur Anthropomatik. 15. ISBN 978-3-86644-955-8
- [176] SCHLEIPEN, M., R. DRATH und O. SAUER. The system-independent data exchange format CAEX for supporting an automatic configuration of a production monitoring and control system. In: *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2008, S. 1786-1791. ISBN 978-1-4244-1665-3

- [177] International Electrotechnical Commission. IEC 62424:2016, Representation of process control engineering - Requests in P&I diagrams and data exchange between P&ID tools and PCE-CAE tools
- [178] AUTOMATIONML CONSORTIUM. Whitepaper AutomationML. Part 2 Role class libraries, 2014
- [179] DRATH, R. Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML. Integration von CAEX, PLCopen XML und COLLADA.

 Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
 ISBN 978-3-642-04674-2
- [180] AUTOMATIONML CONSORTIUM. Whitepaper AutomationML. Part 4 AutomationML Logic Description, 2010
- [181] AUTOMATIONML CONSORTIUM. Whitepaper AutomationML. Part 3 Geometry and Kinematics, 2015
- [182] AUTOMATIONML CONSORTIUM. Best Practice Recommendations. ExternalDataReference, 2016
- [183] AUTOMATIONML E. V. und OPC FOUNDATION. OPC UA Information Model for AutomationML, 2016
- [184] OPC FOUNDATION. *Collaborations: PackML, PRODML, MDIS, AutomationML* [online], 2016 [Zugriff am: 13. Mai 2017]. Verfügbar unter: http://opcconnect.opcfoundation.org/2016/09/collaborations-packml-prodml-mdis-automationml/
- [185] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN SPEC 16592, Kombinieren von OPC Unified Architecture und Automation Markup Language. Berlin: Beuth Verlag
- [186] FRAUNHOFER-INSITITUT FÜR OPTRONIK, SYSTEMTECHNIK UND BILDAUSWERTUNG IOSB. SecurePLUGandWORK [online] [Zugriff am: 10. August 2018]. Verfügbar unter: https://www.secureplugandwork.de
- [187] FRAUNHOFER-INSITITUT FÜR OPTRONIK, SYSTEMTECHNIK UND BILDAUSWERTUNG. SecurePLUGandWORK. visIT, 2014, 8-9
- [188] AUTOMATIONML CONSORTIUM. Whitepaper AutomationML. Part 1 Architecture and general requirements, 2016

- [189] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN 31051:2012-09, *Grundlagen der Instandhaltung.* Berlin: Beuth Verlag
- [190] WECK, M. und C. BRECHER. Werkzeugmaschinen 3. Mechatronische Systeme, Vorschubantriebe, Prozessdiagnose. 6. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. VDI-Buch. ISBN 978-3-540-22506-5
- [191] BINNER, S.M. Framework für eine selbstlernende, auf autonome Verfahren gestützte, Zustandsbewertung von Produktionssystemen mithilfe künstlicher Intelligenz. Ein Ansatz zur Erhöhung der Aussagegüte und Erkennungssicherheit in der Zustandsüberwachung. Herzogenrath: Shaker Verlag, 2012. 2. ISBN 978-3-8440-0849-4
- [192] Verein Deutscher Ingenieure; Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik. VDI/VDE 2650, Anforderungen an Selbstüberwachung und Diagnose in der Feldinstrumentierung Allgemeine Anforderungen. Berlin: Beuth Verlag
- [193] ISERMANN, R. Fault-Diagnosis Systems. An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. ISBN 3-540-24112-4
- [194] KOLERUS, J. und J. WASSERMANN. *Zustandsüberwachung von Maschinen. Das Lehr- und Arbeitsbuch für den Praktiker.* 6. Auflage. Renningen: expert Verlag, 2014. Edition expertsoft. 79. ISBN 978-3-8169-3236-9
- [195] MICHL, M. Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose. Bamberg: Meisenbach Verlag, 2014. Fertigungstechnik Erlangen. 242. ISBN 978-3-87525-356-6
- [196] ZÖLLNER, B. *Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion.*München: Hanser Verlag, 1995. Fertigungstechnik Erlangen. 45.
 ISBN 3-446-18308-6
- [197] HAKE, F.O. Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen. München: Hanser Verlag, 1991. Fertigungstechnik Erlangen. 16. ISBN 3-446-16428-6
- [198] ISERMANN, R. *Mechatronische Systeme. Grundlagen.* 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. ISBN 978-3-540-32336-5

- [199] WANG, D., W.H. TANG und Q.H. WU. Ontology-Based Fault Diagnosis For Power Transformers. In: *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2010, S. 1-8. ISBN 978-1-4244-6549-1
- [200] MELIK-MERKUMIANS, M., A. ZOITL und T. MOSER. Ontology-Based Fault Diagnosis for Industrial Control Applications. In: *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 2010, S. 1-4. ISBN 978-1-4244-6848-5
- [201] YUAN, F.Q. Critical Issues of Applying Machine Learning to Condition Monitoring for Failure Diagnosis. In: *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 2016, S. 1903-1907. ISBN 978-1-5090-3665-3
- [202] KAUR, K., M. SELWAY, G. GROSSMANN, M. STUMPTNER, A. JOHNSTON und P. WONG. Towards an Open Standardsbased Architecture for Condition-based Predictive Maintenance and IIoT. Semantic Web Journal, 2018
- [203] STACHOWIAK, H. *Allgemeine Modelltheorie*. Wien: Springer-Verlag, 1973. ISBN 3-211-81106-0
- [204] BOX, G.E.P. Science and Statistics [online]. *Journal of the American Statistical Association*, 1976, **71**(356), 791-799. ISSN 0162-1459. Verfügbar unter: doi:10.1080/01621459.1976.10480949
- [205] VODENČAREVIĆ, A., H. KLEINE BÜNING, O. NIGGEMANN und A. MAIER. Identifying Behavior Models for Process Plants. In: *IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*, 2011, S. 1-8. ISBN 978-1-4577-0018-7
- [206] WEINBERGER, T., H.B. KELLER, W. JAKOB und B. GROSSE OSTERHUES. Modelle Maschinellen Lernens. Symbolische und konnektionistische Ansätze, 1994. KfK-Berichte. 5184
- [207] WITTEN, I.H. und E. FRANK. *Data Mining. Practical Machine Learning Tools and Techniques.* 2. Auflage: Morgan Kaufmann Publishers, 2005. ISBN 0-12-088407-0
- [208] BEIERLE, C. und G. KERN-ISBERNER. *Methoden wissensbasierter Systeme. Grundlagen Algorithmen Anwendungen.* 2. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2003. Computational Intelligence. ISBN 978-3-663-05681-2

- [209] MOHRI, M., A. ROSTAMIZADEH und A. TALWALKAR. Foundations of Machine Learning. London: MIT Press, 2012. Adaptive computation and machine learning. ISBN 978-0-262-01825-8
- [210] RASCHKA, S. und V. MIRJALILI. Machine Learning mit Python und Scikit-Learn und TensorFlow. Das umfassende Praxis-Handbuch für Data Science, Deep Learning und Predictive Analytics.

 2. Auflage. Frechen: mitp, 2018. ISBN 978-3-95845-733-1
- [211] HASTIE, T., R. TIBSHIRANI und J. FRIEDMAN. *The Elements of Statistical Learning*. 2. Auflage. New York: Springer New York, 2009. ISBN 978-0-387-84857-0
- [212] ROTH, M., J.-J. LESAGE und L. LITZ. Black-box identification of discrete event systems with optimal partitioning of concurrent subsystems. In: *IEEE American Control Conference (ACC)*, 2010, S. 2601-2606. ISBN 978-1-4244-7426-4
- [213] VAANDRAGER, F. Model Learning [online]. *Communications of the ACM*, 2017, **60**(2), 86-95. ISSN 0001-0782. Verfügbar unter: doi:10.1145/2967606
- [214] MAIER, A. Online Passive Learning of Timed Automata for Cyber-Physical Production Systems. In: *IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2014, S. 60-66. ISBN 978-1-4799-4905-2
- [215] CARRASCO, R.C. und J. ONCINA. Learning Stochastic Regular Grammars by Means of a State Merging Method. In:
 J.G. CARBONELL, J. SIEKMANN, G. GOOS, J. HARTMANIS,
 J. LEEUWEN, R.C. CARRASCO und J. ONCINA, Hg. *Grammatical Inference and Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1994, S. 139-152. ISBN 978-3-540-58473-5
- [216] THOLLARD, F., P. DUPONT und C. de LA HIGUERA. Probabilistic DFA Inference Using Kullback-Leibler Divergence and Minimality. In: *International Conference on Machine Learning* (*ICML*), 2000, S. 975-982. ISBN 1-55860-707-2

- [217] SONNTAG, D., S. ZILLNER, P. VAN DER SMAGT und A. LÖRINCZ. Overview of the CPS for Smart Factories Project: Deep Learning, Knowledge Acquisition, Anomaly Detection and Intelligent User Interfaces. In: S. JESCHKE, C. BRECHER, H. SONG und D.B. RAWAT, Hg. *Industrial Internet of Things*. Cham: Springer International Publishing, 2017, S. 487-504. ISBN 978-3-319-42558-0
- JÄGER, M., C. KNOLL und F.A. HAMPRECHT. Weakly Supervised Learning of a Classifier for Unusual Event Detection [online]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2008, 17(9), 1700-1708. ISSN 1057-7149. Verfügbar unter: doi:10.1109/TIP.2008.2001043
- [219] WOLLSCHLÄGER, M., S. THEURICH, A. WINTER, F. LUBNAU und C. PAULITSCH. A Reference Architecture for Condition Monitoring. In: *IEEE World Conference on Factory Communication Systems (WFCS)*, 2015, S. 1-8. ISBN 978-1-4799-8244-8
- [220] Verein Deutscher Maschinen- und Anlagenbau. 24582:2014-04, Feldbusneutrale Referenzarchitektur für Condition Monitoring in der Fabrikautomation. Berlin: Beuth Verlag
- [221] SHROFF, M., J. KESKINEN, O. NORRBACK, S. JUNNILA, J. TAKALUOMA und P. TUOMINEN. MIMOSA and OPC UA Applied in Wapice Remote Management System. *Automaatio XIX seminar*, 2011, (03)
- [222] HÄSTBACKA, D., L. BARNA, M. KARAILA, Y. LIANG, P. TUOMINEN und S. KUIKKA. Device Status Information Service Architecture for Condition Monitoring Using OPC UA. In: IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2014, S. 1-7. ISBN 978-1-4799-4845-1
- [223] BLANCHET, M., T. RINN, G. von THADEN und G. de THIULLOY. *THINK ACT Industry 4.0. The new industrial revolution How Europe will succeed.* München, 2014
- [224] SENDEREK, R., T. MÜHLBRADT und A. BUSCHMEYER. Demografiesensibles Kompetenzmanagement für die Industrie 4.o. In: S. JESCHKE, A. RICHERT, F. HEES und C. JOOß, Hg. Exploring Demographics: Transdisziplinäre Perspektiven zur Innovationsfähigkeit im demografischen Wandel. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 281-295. ISBN 978-3-658-08791-3

- [225] LÜDTKE, A. Wege aus der Ironie in Richtung ernsthafter Automatisierung. In: A. BOTTHOF und E.A. HARTMANN, Hg. *Zukunft der Arbeit in Industrie 4.*0. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015, S. 125-146. ISBN 978-3-662-45914-0
- [226] HOBSCHEIDT, D., T. WESTERMANN, R. DUMITRESCU, C. DÜLME, J. GAUSEMEIER, H. HEPPNER und G. MAIER. Soziotechnische Leistungsbewertung von Unternehmen im Kontext Industrie 4.0. In: Wissenschaftsforum Intelligente Technische Systeme (WInTeSys) 2017. Paderborn: Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, 2017, S. 11-24. ISBN 978-3-942647-88-5
- [227] STOCKER, A., A. DENGER, J. FRITZ, C. KITTL und A. RICHTER. Smart Factories: Mitarbeiter-zentrierte Informationssysteme für die Zusammenarbeit der Zukunft. In: M. KOCH, A. BUTZ, SCHLICHTER und J., Hg. *Mensch und Computer 2014 Workshopband:* Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2014, S. 251-257
- [228] DEUSE, J., F. BUSCH, K. WEISNER und M. STEFFEN. Gestaltung sozio-technischer Arbeitssysteme für Industrie 4.0. In: H. HIRSCH-KREINSEN, Hg. Digitalisierung industrieller Arbeit. Die Vision Industrie 4.0 und ihre sozialen Herausforderungen. Berlin: Nomos Verlagsgesellschaft, 2015, S. 147-164. ISBN 978-3-84872-225-9
- [229] ITTERMANN, P. und J. NIEHAUS. Industrie 4.0 und Wandel von Industriearbeit. Überblick über Forschungsstand und Trendbestimmungen. In: H. HIRSCH-KREINSEN, Hg. Digitalisierung industrieller Arbeit. Die Vision Industrie 4.0 und ihre sozialen Herausforderungen. Berlin: Nomos Verlagsgesellschaft, 2015, S. 1-7. ISBN 978-3-84872-225-9
- [230] FRAZZON, E.M., J. HARTMANN, T. MAKUSCHEWITZ und B. SCHOLZ-REITER. Towards Socio-Cyber-Physical Systems in Production Networks [online]. *CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP-CMS)*, 2013, **7**, 49-54. ISSN 2212-8271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2013.05.009
- VROOM, R.W. und I. HORVÁTH. Cyber-physical augmentation An exploration. In: I. HORVÁTH, Hg. International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering (TMCE). Tools and methods of competitive engineering, 2014. ISBN 978-94-6186-177-1

- [232] WANG, F.-Y. The Emergence of Intelligent Enterprises: From CPS to CPSS [online]. *IEEE Intelligent Systems*, 2010, 25(4), 85-88. ISSN 1541-1672. Verfügbar unter: doi:10.1109/MIS.2010.104
- [233] LIU, Z., D.-S. YANG, D. WEN, W.-M. ZHANG und W. MAO. Cyber-Physical-Social Systems for Command and Control [online]. *IEEE Intelligent Systems*, 2011, 26(4), 92-96. ISSN 1541-1672. Verfügbar unter: doi:10.1109/MIS.2011.69
- [234] HUSSEIN, D., S. PARK, S.N. HAN und N. CRESPI. Dynamic Social Structure of Things [online]. A Contextual Approach in CPSS. *IEEE Internet Computing*, 2015, 19(3), 12-20. ISSN 1089-7801. Verfügbar unter: doi:10.1109/MIC.2015.27
- [235] SHETH, A., P. ANANTHARAM und C. HENSON. Physical-Cyber-Social Computing: An Early 21st Century Approach [online]. *IEEE Intelligent Systems*, 2013, 28(1), 78-82. ISSN 1541-1672. Verfügbar unter: doi:10.1109/MIS.2013.20
- [236] HOLLNAGEL, E. und D.D. WOODS. *Joint Cognitive Systems*. Foundations of Cognitive Systems Engineering: CRC Press, 2005. ISBN 0-8493-2821-7
- [237] ATZORI, L., D. CARBONI und A. IERA. Smart things in the social loop [online]. Paradigms, technologies, and potentials. *Ad Hoc Networks*, 2014, **18**, 121-132. ISSN 1570-8705. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.adhoc.2013.03.012
- [238] SIEMIENIUCH, C.E., M.A. SINCLAIR und M.J.d. HENSHAW. Global drivers, sustainable manufacturing and systems ergonomics [online]. *Applied Ergonomics*, 2015, **51**, 104-119. ISSN 0003-6870. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.apergo.2015.04.018
- [239] JONES, A., E. SUBRAHMANIAN, A. HAMINS und C. GRANT. Humans' Critical Role in Smart Systems: A Smart Firefighting Example [online]. *IEEE Internet Computing*, 2015, **19**(3), 28-31. Verfügbar unter: doi:10.1109/MIC.2015.54
- [240] NGUYEN, T. A Modelling & Simulation Based Engineering Approach for Socio-Cyber-Physical Systems. From Prospective Studies to Operation, Maintenance and Upgrades. In: *IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, 2017, S. 702-707. ISBN 978-1-5090-4429-0

- [241] WINDELBAND, L. und B. DWORSCHAK. Arbeit und Kompetenzen in der Industrie 4.o. Anwendungsszenarien Instandhaltung und Leichtbaurobotik. In: H. HIRSCH-KREINSEN, Hg. *Digitalisierung industrieller Arbeit. Die Vision Industrie 4.o und ihre sozialen Herausforderungen*. Berlin: Nomos Verlagsgesellschaft, 2015, S. 71-86. ISBN 978-3-84872-225-9
- [242] WEIDNER, R., T. REDLICH und J.P. WULFSBERG, Hg. *Technische Unterstützungssysteme*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2015. ISBN 978-3-662-48383-1
- [243] SYSKA, A. *Produktionsmanagement:* Gabler Verlag, 2006. ISBN 978-3-8349-9091-4
- [244] ÖNO, T. *Das Toyota-Produktionssystem*. Frankfurt am Main: Campus Verlag, 2005. ISBN 3-593-37801-9
- [245] JAMRO, M. und B. TRYBUS. IEC 61131-3 Programmable Human Machine Interfaces for Control Devices. In: *IEEE International Conference on Human System Interactions (HSI)*, 2013, S. 48-55. ISBN 978-1-4673-5637-4
- [246] WASSILEW, S., L. URBAS, J. LADIGES, A. FAY und T. HOLM. Transformation of the NAMUR MTP to OPC UA to allow Plug and Produce for Modular Process Automation. In: *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 2016, S. 1-9
- [247] WASSILEW, S., M. OBST, C.P. IATROU und L. URBAS. Abbildung des NAMUR Module Type Package auf OPC UA [online]. at Automatisierungstechnik, 2017, 65(1). ISSN 2196-677X. Verfügbar unter: doi:10.1515/auto-2016-0103
- [248] OBST, M., T. HOLM, L. URBAS, A. FAY, S. KREFT, U. HEMPEN und T. ALBERS. Semantic description of process modules. In: *IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*, 2015, S. 1-8. ISBN 978-1-4673-7929-8
- [249] AHMAD, B., X. KONG, R. HARRISON, J. WATERMANN und A.W. COLOMBO. Automatic Generation of Human Machine Interface Screens from Component-Based Reconfigurable Virtual Manufacturing Cell. In: *Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, 2013, S. 7428-7433. ISBN 978-1-4799-0224-8

- [250] KNÖPFEL, A., B. GRÖNE und P. TABELING. Fundamental Modeling Concepts. Effective Communication of IT Systems: Wiley, 2005. ISBN 978-0-470-02710-3
- [251] TABELING, P. *Softwaresysteme und ihre Modellierung. Grundlagen, Methoden und Techniken*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. eXamen.press. ISBN 978-3-540-25828-5
- VAN TAN, V., D.-S. YOO und M.-J. YI. A SOA-Based Framework for Building Monitoring and Control Software Systems. In:
 D. HUTCHISON, T. KANADE, J. KITTLER, J.M. KLEINBERG, F. MATTERN, J.C. MITCHELL, M. NAOR, O. NIERSTRASZ, C. PANDU RANGAN, B. STEFFEN, M. SUDAN, D. TERZOPOULOS, D. TYGAR, M.Y. VARDI, G. WEIKUM, D.-S. HUANG, K.-H. JO, H.-H. LEE, H.-J. KANG und V. BEVILACQUA, Hg. *Emerging Intelligent Computing Technology and Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009, S. 1013-1027. ISBN 978-3-642-04019-1
- [253] HÄSTBACKA, D., P. KANNISTO und S. KUIKKA. Business Process Modeling and SOA in Industrial O&M Application Development. In: R. ZHANG, Hg. *International Conference on Enterprise Information Systems (ICEIS):* SciTePress, 2011, S. 277-285. ISBN 978-989-8425-55-3
- [254] HÄSTBACKA, D., E. JANTUNEN, M. KARAILA und L. BARNA. Service-based Condition Monitoring for Cloud-enabled Maintenance Operations. In: *IEEE Annual Conference of the IEEE Indust-rial Electronics Society (IECON)*, 2016, S. 5289-5295. ISBN 978-1-5090-3474-1
- [255] HENNESSY, J.L. und D.A. PATTERSON. *Computer Architecture. A Quantitative Approach.* 5. Auflage: Morgan Kaufmann Publishers, 2012. ISBN 978-0-12-383872-8
- [256] SEILONEN, I., A. TUOMI, J. OLLI und K. KOSKINEN. Service-Oriented Application Integration for Condition-Based Maintenance with OPC Unified Architecture. In: *IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2011, S. 45-50. ISBN 978-1-4577-0435-2

- [257] DENNERT, A., J.G.I. MONTEMAYOR, J. KRAUSE, S. HESSE, J.L.M. LASTRA und M. WOLLSCHLÄGER. Advanced Concepts for Flexible Data Integration in Heterogeneous Production Environments [online]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2013, 46(7), 348-353. Verfügbar unter: doi:10.3182/20130522-3-BR-4036.00047
- [258] VASYUTYNSKYY, V., C. HENGSTLER, D. NADOVEZA, J. MCCARTHY, K.G. BRENNAN und A. DENNERT. Layered Architecture for Production and Logistics Cockpits. In: *IEEE International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*, 2012, S. 1-9. ISBN 978-1-4673-4737-2
- [259] International Electrotechnical Commission. IEC 61499-1:2012, Function blocks Part 1: Architecture
- [260] SREENUCH, T., A. TSOURDOS und I.K. JENNIONS. Distributed embedded condition monitoring systems based on OSA-CBM standard [online]. *Computer Standards & Interfaces*, 2013, 35(2), 238-246. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.csi.2012.10.002
- [261] GÖHRINGER, J. Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen. Bamberg: Meisenbach Verlag, 2001. Fertigungstechnik Erlangen. 111. ISBN 3-87525-147-4
- [262] MERTEN, M. *Active automata learning for real life applications.* Technische Universität Dortmund, 2013
- [263] GÖSSLING, A. Device Information Modeling in Automation. A Computer-Scientific Approach. Technische Universität Dresden, 2014
- [264] KOHL, J. Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexiblen Fabrik. Bamberg:
 Meisenbach Verlag, 2016. Fertigungstechnik Erlangen. 282.
 ISBN 978-3-87525-406-8
- [265] PARYANTO. Mechatronic Simulation Approach for the Process Planning of Energy-Efficient Handling Systems. Bamberg: Meisenbach Verlag. Fertigungstechnik Erlangen. 297. ISBN 978-3-87525-424-2
- [266] REIDT, A. Referenzarchitektur eines integrierten Informationssystems zur Unterstützung der Instandhaltung. Technische Universität München, 2019

- [267] HORBACH, S. und U. TROMMLER. Konzeption und Umsetzung eines Ressourcen-Cockpits für die Instandhaltung [online]. 81-102 Seiten / aw&l Report, Bd. 1 (2017): S-CPS: Ressourcen-Cockpit für Sozio-Cyber-Physische Systeme, 2017. Verfügbar unter: doi:10.14464/awir.viio.108
- [268] WÄCHTER, M. Engineering-Methode zur Gestaltung gebrauchstauglicher tangibler Mensch-Maschine-Schnittstellen für Planer und Entwickler von Produktionsassistenzsystemen. Technische Universität Chemnitz, 2018
- [269] BEETZ, S. Beitrag zur Methode der Arbeitsplatz-integrierten Assistenz am Beispiel der Formmesstechnik. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2006
- [270] MASAN, G. Konfigurationsmanagement als Mittel der Instandhaltungsanalyse. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2007
- [271] ROY, D.T. Industrie 4.0 Gestaltung cyber-physischer Logistiksysteme zur Unterstützung des Logistikmanagements in der Smart Factory. Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin, 2017. Schriftenreihe Logistik der Technischen Universität Berlin. 38. ISBN 978-3-7983-2944-7
- [272] WERNER, R. Störungstolerantes Sensorsystem zur Zustandsüberwachung rotodynamischer Pumpen. Technische Universität Darmstadt, 2012
- [273] WESTERMANN, T. Systematik zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical Systems des Maschinen- und Anlagenbaus. Universität Paderborn, 2017
- [274] MERTENS, M. Verwaltung und Verarbeitung merkmalbasierter Informationen. Vom Metamodell zur technologischen Realisierung. Düsseldorf: VDI Verlag, 2012. Fortschritt-Berichte VDI / Reihe 8 Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik. 1207. ISBN 978-3-18-520708-2
- [275] LAGHMOUCHI, A. Adaptives Entwicklungstool zur intelligenten Konfigurierung von Condition-Monitoring-Algorithmen, 2017.
 Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin.
 ISBN 978-3-8396-1222-4

- [276] WBK INSTITUT FÜR PRODUKTIONSTECHNIK. *Projekt-beschreibung Intro 4.0* [online], 2016 [Zugriff am: 30. März 2017]. Verfügbar unter: http://www.intro40.de/
- [277] LANZA, G., P. NYHUIS, S.M. ANSARI, T. KUPRAT und C. LIEBRECHT. Befähigungs- und Einführungsstrategien für Industrie 4.0 [online]. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 2016, 111(1-2), 76-79. Verfügbar unter: doi:10.3139/104.111462
- [278] FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR PRODUKTIONSANLAGEN UND KONSTRUKTIONSTECHNIK IPK. RETRONET [online]. Praxisnahe Brücke in die Industrie 4.0 [Zugriff am: 20. April 2017]. Verfügbar unter: https://www.ipk.fraunhofer.de/fileadmin/user_upload/IPK/publikationen/themenblaetter/aut_RetroNet_web.pdf
- [279] LUER, H. *RETRONET* [online], 2016 [Zugriff am: 16. April 2017]. Verfügbar unter: http://www.retronet.info/
- [280] SCHRECK, G. RETRONET Praxisnahe Brücke in die Industrie 4.0 [online] [Zugriff am: 10. August 2018]. Verfügbar unter: https://www.ipk.fraunhofer.de/fileadmin/user_upload/IPK/publikationen/themenblaetter/aut_RetroNet_web.pdf
- [281] KOCH, M. *BaSys 4.0* [online] [Zugriff am: 1. April 2017]. Verfügbar unter: http://www.basys40.de/
- [282] CHAVES, F. SecurePLUGandWORK [online] [Zugriff am: 1. April 2017]. Verfügbar unter: http://www.secureplugandwork.de/servlet/is/10291/
- [283] WINDMANN, S., A. MAIER, O. NIGGEMANN, C. FREY, A. BERNARDI, Y. GU, H. PFROMMER, T. STECKEL, M. KRÜGER und R. KRAUS. Big Data Analysis of Manufacturing Processes [online]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2015, **659**, 12055. ISSN 1742-6588. Verfügbar unter: doi:10.1088/1742-6596/659/1/012055
- [284] GU, Y., A. BERNARDI, T. STECKEL und A. MAIER. Anomaly Detection in Sensor Data provided by Combine Harvesters. In: *IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2016, S. 1276-1281. ISBN 978-1-5090-2870-2

- [285] UNIVERSITÄT KASSEL. FEE Frühzeitige Erkennung und Entscheidungsunterstützung für kritische Situationen im Produktionsumfeld [online]. Big Data zur Unterstützung von Anlagenfahrern in der chemischen Industrie [Zugriff am: 17. September 2017]. Verfügbar unter: https://www.fee-projekt.de/
- [286] BERGWEILER, S. Intelligent Manufacturing based on Self-Monitoring Cyber-Physical Systems. In: C. BECKER WESTPHALL, J. LLORET MAURI und P. POCHEC, Hg. International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies (UBICOMM): IARIA XPS Press, 2015. ISBN 978-1-61208-418-3
- [287] FRANK, H. *Cyber-Physische Produktionssysteme (CyProS)*[online] [Zugriff am: 17. September 2017]. Verfügbar unter: http://www.projekt-cypros.de/
- [288] LEHRSTUHL FÜR AUTOMATISIERUNG UND INFORMATI-ONSSYSTEME, TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN.

 SIDAP [online]. Skalierbares Integrationskonzept zur Datenaggregation, -analyse, -aufbereitung von großen Datenmengen in der Prozessindustrie [Zugriff am: 23. September 2017]. Verfügbar unter: http://www.sidap.de/
- [289] LEHRSTUHL FÜR FERTIGUNGSAUTOMATISIERUNG UND PRODUKTIONSSYSTEMATIK, FRIEDRICH-ALEXANDER-UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG. CoMoRes: Entwicklung eines Condition Monitoring Systems zur Steigerung der Energie-und Ressourceneffizienz von Fräs-Dreh-Zentren [online]
 [Zugriff am: 28. Januar 2018]. Verfügbar unter: http://www.greenfactorybavaria.de/
- [290] BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG. Technikbasierte Dienstleistungssysteme [online] [Zugriff am: 28. Januar 2018]. Verfügbar unter: https://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung-1096.html
- [291] SABOU, M., O. KOVALENKO, F. EKAPUTRA und S. BIFFL. Beiträge des Semantic Web zum Engineering für Industrie 4.o. In: B. VOGEL-HEUSER, T. BAUERNHANSL und M. ten HOMPEL, Hg. *Handbuch Industrie 4.o. Automatisierung*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017, S. 293-313. ISBN 978-3-66253-248-5

- [292] EGE, B., B. HUMM und A. REIBOLD, Hg. *Corporate Semantic Web. Wie semantische Anwendungen in Unternehmen Nutzen stiften*. Berlin: Springer Vieweg, 2015. X.media.press. ISBN 978-3-642-54885-7
- [293] WOOD, A. und J. STANKOVIC. Security of Distributed,
 Ubiquitous, and Embedded Computing Platforms. In:
 J.G. VOELLER, Hg. Wiley handbook of science and technology for homeland security: Wiley, 2010. ISBN 978-0-471-76130-3
- [294] WIELAND, U., M. FISCHER und A. HILBERT. Prozessverbesserung im Kontext von Industrie 4.0 ein Geschäftsmodellansatz für IT-Unternehmen. *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik*, 2013, **50**(292), 63-72
- [295] ALDRICH, C. und L. AURET. *Unsupervised Process Monitoring* and Fault Diagnosis with Machine Learning Methods. London: Springer, 2013. Advances in Computer Vision and Pattern Recognition. ISBN 978-1-4471-5184-5
- [296] MAHNKE, W., A. GÖSSLING, M. GRAUBE und L. URBAS. Information Modeling for Middleware in Automation. In: *IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*, 2011, S. 1-7. ISBN 978-1-4577-0018-7
- [297] UCKELMANN, D., M. HARRISON und F. MICHAHELLES, Hg. *Architecting the Internet of Things*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. ISBN 978-3-642-19156-5
- [298] NODE.JS FOUNDATION. *Node.js JavaScript runtime* [online] [Zugriff am: 10. August 2018]. Verfügbar unter: https://nodejs.org
- [299] FETTE, I. und A. MELNIKOV. *The WebSocket Protocol* [online], Dezember 2011 [Zugriff am: 7. Oktober 2017]. Verfügbar unter: https://tools.ietf.org/html/rfc6455
- [300] PREDIGER, R. und R. WINZINGER. *Node.js. Professionell hoch*performante Software entwickeln. München: Hanser Verlag, 2015. ISBN 978-3-446-43722-7
- [301] APACHE SOFTWARE FOUNDATION. *Apache OpenOffice* [online] [Zugriff am: 7. Juli 2018]. Verfügbar unter: https://www.openoffice.org/

- [302] RYKOVANOV, A. *Free OPC UA Modeler* [online] [Zugriff am: 7. Juli 2018]. Verfügbar unter: https://github.com/FreeOpcUa/opcua-modeler
- [303] BROSSOG, M., C. HARTMANN, J. KOHL, J. MERHOF, M. REICHENBACH, D. FEY und J. FRANKE. Prozessflexible Steuerung von Industrierobotern. Integration von optischer Sensorik und Energiemesstechnik in eine automatisierte Prüfzelle. wt Werkstattstechnik online, 2014, 104(9), 535-540
- [304] GRAPHML WORKING GROUP. *GraphML* [online] [Zugriff am: 24. Februar 2018]. Verfügbar unter: http://graphml.graphdrawing.org/
- [305] WÄCHTER, M., A. HÖHNEL, T. LÖFFLER und A.C. BULLINGER-HOFFMANN. Partizipative Gestaltung eines gebrauchstauglichen mobilen Assistenzsystems für Instandhalter [online]. S-CPS: Ressourcen-Cockpit für Sozio-Cyber-Physische Systeme. *Abschlussveröffentlichung*, 2017, (1), 117-130. Verfügbar unter: doi:10.14464/awir.viio.110
- [306] BENGEL, G., C. BAUN, M. KUNZE und K.-U. STUCKY. *Master-kurs Parallele und Verteilte Systeme:* Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. ISBN 978-3-8348-1671-9
- [307] JS FOUNDATION. *Node-RED* [online] [Zugriff am: 7. Juli 2018]. Verfügbar unter: https://nodered.org/
- [308] NETWORKX DEVELOPERS. *NetworkX* [online] [Zugriff am: 7. Juli 2018]. Verfügbar unter: https://networkx.github.io/
- [309] RABINER, L. und B. JUANG. An Introduction to Hidden Markov Models [online]. *IEEE ASSP Magazine*, 1986, **3**(1), 4-16. ISSN 0740-7467. Verfügbar unter: doi:10.1109/MASSP.1986.1165342
- [310] ISERMANN, R. Model-based fault-detection and diagnosis status and applications [online]. *Annual Reviews in Control*, 2005, 29(1), 71-85. ISSN 1367-5788. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.arcontrol.2004.12.002
- [311] VODENČAREVIĆ, A., H. KLEINE BÜNING, O. NIGGEMANN und A. MAIER. Using Behavior Models for Anomaly Detection in Hybrid Systems. In: *IEEE International Symposium on Information, Communication and Automation Technologies (ICAT)*, 2011, S. 1-8. ISBN 978-1-4577-0744-5

- [312] TOURNADE, Y. *Peak Detection in the Python World* [online] [Zugriff am: 14. Juli 2018]. Verfügbar unter: https://blog.ytotech.com/2015/11/01/findpeaks-in-python/
- [313] BILLAUER, E. *Peak detection using MATLAB* [online] [Zugriff am: 14. Juli 2018]. Verfügbar unter: http://billauer.co.il/peakdet.html
- [314] MÜLLER, M. *Information Retrieval for Music and Motion*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. ISBN 978-3-540-74048-3
- [315] VASQUEZ-CORREA, J.C., J.R. OROZCO-ARROYAVE und E. NÖTH. Word Accuracy and Dynamic Time Warping to Assess Intelligibility Deficits in Patients with Parkinsons Disease. In: *IEEE Symposium on Signal Processing, Images and Artificial Vision (STSIVA)*, 2016, S. 1-5. ISBN 978-1-5090-3798-8
- [316] CASSISI, C., P. MONTALTO, M. ALIOTTA, A. CANNATA und A. PULVIRENTI. Similarity Measures and Dimensionality Reduction Techniques for Time Series Data Mining. In: A. KARAHOCA, Hg. Advances in Data Mining Knowledge Discovery and Applications: InTech, 2012. ISBN 978-953-51-0748-4
- [317] FERREIRA, R.J., J. MACHADO und H. ROSE. Cloud-Based Framework for Advanced Maintenance Tasks. In: *IEEE* International Conference on Industrial Informatics (INDIN), 2015, S. 1324-1329. ISBN 978-1-4799-6650-9
- [318] DOCKER INC. *Docker* [online] [Zugriff am: 10. August 2018]. Verfügbar unter: https://www.docker.com/
- [319] SPIES, T. Generische Architekturen. Erzeugung und Visualisierung kontextspezifischer Sichten am Beispiel serviceorientierter Architekturen. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Gabler, 2011. Gabler research: Information Engineering und IV-Controlling. ISBN 978-3-8349-2854-2
- [320] GÜBELI, R. *Mikroprozessor-Hardware und Programmiertechniken.* 2. Auflage. Zürich: vdf Hochschulverlag, 2010. vdf-Lehrbuch Informatik. ISBN 978-3-7281-3256-7
- [321] SUTANTO, A. Solution approaches for planning of assembly systems in three-dimensional virtual environments. Bamberg: Meisenbach, 2005. Fertigungstechnik Erlangen. 158. ISBN 3-87525-220-9

- [322] MERHOF, J. Semantische Modellierung automatisierter Produktionssysteme zur Verbesserung der IT-Integration zwischen Anlagen-Engineering und Steuerungsebene. Bamberg: Meisenbach Verlag, 2016. Fertigungstechnik Erlangen. 278. ISBN 978-3-87525-402-0
- [323] GLUCHOWSKI, P. und P. CHAMONI. *Analytische Informations*systeme. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN 978-3-662-47762-5
- [324] FIELDING, R., J. GETTYS, J. MOGUL, H. FRYSTYK, L. MASINTER, P. LEACH und T. BERNERS-LEE. *Hypertext Transfer Protocol—HTTP/1.1* [online], Juni 1999 [Zugriff am: 7. Oktober 2017]. Verfügbar unter: https://tools.ietf.org/html/rfc2616
- [325] GOOGLE INC. *Chrome* [online] [Zugriff am: 13. Januar 2018]. Verfügbar unter: https://www.google.de/chrome
- [326] KHRONOS WEBGL WORKING GROUP. WebGL Specification [online] [Zugriff am: 12. Oktober 2017]. Verfügbar unter: https://www.khronos.org/registry/webgl/specs/latest/1.o/
- [327] BARNES, M., E.L. FINCH und S.C.E. INC. COLLADA Digital Asset Schema Release 1.5.0. Specification, 2008
- [328] CABELLO, R. *three.js* [online], 2017 [Zugriff am: 12. Oktober 2017]. Verfügbar unter: https://threejs.org/
- [329] ARRACHEQUESNE, D. *Socket.IO* [online] [Zugriff am: 15. Oktober 2017]. Verfügbar unter: http://socket.io/
- [330] NONAKA, I., F. MADER und H. TAKEUCHI. *Die Organisation des Wissens. Wie japanische Unternehmen eine brachliegende Ressource nutzbar machen.* Frankfurt am Main: Campus Frankfurt, 2012. ISBN 3-593-35643-0
- [331] HELLER, F. Wissensbasiertes Online-Störungsmanagement flexibler, hoch automatisierter Montagesysteme: HNI-Verlagsschriftenreihe, 2003. Heinz-Nixdorf-Institut, Universität Paderborn. 129. ISBN 3-935433-38-7
- [332] KHALAF, S. Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Erstellung energieeffizienter Fertigungsstrategien für verkettete Fertigungssysteme. Herzogenrath: Shaker Verlag, 2012. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Produktionssysteme. 11. ISBN 978-3-8440-1484-6

- [333] OTTO, J., B. VOGEL-HEUSER und O. NIGGEMANN. Optimizing Modular and Reconfigurable Cyber-Physical Production Systems by Determining Parameters Automatically. In: *IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2016, S. 1100-1105. ISBN 978-1-5090-2870-2
- [334] WINDMANN, S., O. NIGGEMANN und H. STICHWEH. Energy Efficiency Optimization by Automatic Coordination of Motor Speeds in Conveying Systems. In: *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2015, S. 731-737. ISBN 978-1-4799-7800-7
- [335] STRUBE, G. Modelling Motivation and Action Control in Cognitive Systems. In: U. SCHMID, J. KREMS und F. WYSOCKI, Hg. *Mind Modelling*, 1998, S. 89-108
- [336] DUMITRESCU, R. Entwicklungssystematik zur Integration kognitiver Funktionen in fortgeschrittene mechatronische Systeme.
 Universität Paderborn, 2010
- [337] NAUMANN, R. *Modellierung und Verarbeitung vernetzter intelligenter mechatronischer Systeme*. Düsseldorf: VDI Verlag, 2000. Fortschritt-Berichte / VDI Rechnerunterstützte Verfahren. 318. ISBN 978-3-18-331820-9
- [338] MÜNCH, E. Selbstoptimierung verteilter mechatronischer Systeme auf Basis paretooptimaler Systemkonfigurationen: Heinz-Nixdorf-Inst., Univ. Paderborn, 2012. HNI-Verlagsschriftenreihe. 321. ISBN 978-3-942647-40-3
- [339] FRANK, U., H. GIESE, F. KLEIN, O. OBERSCHELP, A. SCHMIDT, B. SCHULZ, H. VÖCKING und K. WITTING. Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus. Definition der Selbstoptimierung, 2004
- [340] GU, X.-F., L. YANG und S. WU. A Real-time Stream System based on Node.js. In: *IEEE International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP)*, 2014, S. 479-482. ISBN 978-1-4799-7207-4
- [341] PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. *Python Programming Language* [online] [Zugriff am: 10. August 2018]. Verfügbar unter: https://www.python.org/

- [342] INGENIEURGESELLSCHAFT FÜR MASCHINEN-, ANLAGEN-UND KRAFTFAHRZEUGBAU. Modulares und intelligent automatisiertes Gesamtprüfsystem für die Leiterplattentechnologie [online] [Zugriff am: 10. Januar 2018]. Verfügbar unter: http://imak-group.com/
- [343] International Electrotechnical Commission. IEC 61158-1:2014, Industrial communication networks - Fieldbus specifications - Part 1: Overview and guidance for the IEC 61158 and IEC 61784 series
- [344] GOOGLE INC. *AngularJS* [online] [Zugriff am: 10. August 2018]. Verfügbar unter: https://angularjs.org/
- [345] HAREL, D. Statecharts [online]. A Visual Formalism for Complex Systems. *Science of Computer Programming*, 1987, **8**(3), 231-274. ISSN 0167-6423. Verfügbar unter: doi:10.1016/0167-6423(87)90035-9
- [346] FIELDING, R.T. Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures [online], 2000 [Zugriff am: 10. Januar 2018]. Verfügbar unter: https://www.ics.uci.edu/~fielding/pubs/dissertation
- [347] NEUGEBAUER, R. Werkzeugmaschinen. Aufbau, Funktion und Anwendung von spanenden und abtragenden Werkzeugmaschinen. Berlin: Springer, 2012. VDI-Buch. ISBN 978-3-642-30077-6
- [348] HIRSCH, A. Werkzeugmaschinen. Anforderungen, Auslegung, Ausführungsbeispiele. 3. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. Springer Lehrbuch. ISBN 978-3-658-14248-3
- [349] HABERKERN, A. Leistungsfähigere Kugelgewindetriebe durch Beschichtung. Karlsruher Institut für Technologie, 1998
- [350] BERTRAM, O. Energieautarker sensorischer Kugelgewindetrieb. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH, 2012. Berichte aus dem IFW. 8. ISBN 978-3-943104-69-1
- [351] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN ISO 3408-2, Kugelgewindetriebe - Teil 2: Nenndurchmesser und Nennsteigungen; Metrische Reihe. Berlin: Beuth Verlag
- [352] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN ISO 3408-3, Kugelgewindetriebe - Teil 3: Abnahmebedingungen und Abnahmeprüfungen. Berlin: Beuth Verlag

- [353] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN ISO 3408-5, Kugelgewindetriebe Teil 5: Statische und dynamische axiale Tragzahl und Lebensdauer. Berlin: Beuth Verlag
- [354] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN ISO 3408-4, Kugelgewindetriebe - Teil 4: Statische axiale Steifigkeit. Berlin: Beuth Verlag
- [355] HENNRICH, H. Aufbau eines kombinierten belastungs- und zustandsorientierten Diagnose- und Prognosesystems für Kugelgewindetriebe. Herzogenrath: Shaker Verlag, 2013. Forschungsberichte aus dem wbk Institut für Produktionstechnik. 176. ISBN 978-3-8440-2312-1
- [356] BRECHER, C. und M. WECK. Führungen, Lagerungen und Vorschubsysteme. In: C. BRECHER und M. WECK, Hg. *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2017, S. 203-404. ISBN 978-3-662-46566-0
- [357] LÓPEZ DE LACALLE, N. und A. LAMIKIZ. *Machine Tools for High Performance Machining*. London: Springer, 2009. ISBN 978-1-84800-379-8
- [358] WANG, L. und R.X. GAO, Hg. Condition Monitoring and Control for Intelligent Manufacturing. London: Springer-Verlag, 2006. Springer Series in Advanced Manufacturing. ISBN 978-1-84628-269-0
- [359] BORGMANN, H., Hg. *Actuator 14.* Bremen: Messe Bremen WFB Wirtschaftsförderung, 2014. ISBN 978-3-933339-22-5
- [360] BIEHL, S., S. STAUFENBIEL, S. RECKNAGEL, B. DENKENA und O. BERTRAM. Thin Film Sensors for Condition Monitoring in Ball Screw Drives. In: B. DENKENA, J. GAUSEMEIER und B. SCHOLZ-REITER, Hg. System-Integrated intelligence. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH, 2012. ISBN 978-3-943104-59-2
- [361] CHEN, J., J. YANG, H. ZHOU, H. XIANG, Z. ZHU, Y. LI, C.-H. LEE und G. XU. CPS Modeling of CNC Machine Tool Work Processes Using an Instruction-Domain Based Approach [online]. *Engineering*, 2015, 1(2), 247-260. ISSN 2095-8099. Verfügbar unter: doi:10.15302/J-ENG-2015054

- [362] FORSTMANN, J. Kugelgewindetriebe im Einsatz an Kunststoffspritzgießmaschinen – Lebensdauerprognose und Optimierung. Universität Duisburg-Essen, 2010
- [363] BAUER, M., M. KLEY und M. THOMISCH. Smarte Leichtbaulagerung durch innovative Sensorintegration und intelligente Auswertealgorithmen. In: H. BINZ, B. BERTSCHE, W. BAUER, D. SPATH und D. ROTH, Hg. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP): Universität Stuttgart, 2017
- [364] FREY, S. Verbesserung des dynamischen Verhaltens von Vorschubantrieben durch semiaktive Dämpfung. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2014. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung. 24. ISBN 978-3-8396-0648-3
- [365] GSELL, S.C. *Antriebsbasierte Schwingungsdämpfung für Werkzeugmaschinen und Fahrzeugantriebe.* Aachen: Apprimus Verlag, 2017. Ergebnisse aus der Produktionstechnik. Band 14/2017. ISBN 978-3-86359-522-7
- [366] MÜNZING, T. Auslegung von Kugelgewindetrieben bei oszillierenden Bewegungen und dynamischer Belastung. Stuttgart: Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, 2017. Bericht / Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart. 672. ISBN 978-3-946924-02-9
- [367] NAUBERT, A., H. BINZ und M. BACHMANN. Testing of a Pyrotechnically Actuated Mechanism in Safety Applications. In: H. BORGMANN, Hg. *Actuator 14*. Bremen: Messe Bremen WFB Wirtschaftsförderung, 2014. ISBN 978-3-933339-22-5
- [368] OLARRA, A., L. URIARTE und I. RUIZ DE ARGANDOÑA. New Developments in Drives and Tables. In: L.N. LÓPEZ DE LACALLE und A. LAMIKIZ, Hg. *Machine Tools for High Performance Machining*. London: Springer London, 2009, S. 129-158. ISBN 978-1-84800-379-8
- [369] RUDOLF, T.M. Adaptierbare Parametrierung von Diagnosesystemen durch Verwendung digitaler Antriebssignale in der Prozessüberwachung. Aachen: Hochschulbibliothek der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2014. Ergebnisse aus der Produktionstechnik. 18. ISBN 978-3-86359-208-0

- [370] SCHOPP, M. Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben. Aachen: Shaker, 2010. Forschungsberichte aus dem wbk, Institut für Produktionstechnik Universität Karlsruhe. ISBN 978-3-8322-8733-7
- [371] YAGMUR, T. Analyse, Verbesserung und Beschreibung des Verschleißverhaltens von Kugelgewindetrieben für Werkzeugmaschinen. Aachen: Apprimus-Verlag, 2014. Ergebnisse aus der Produktionstechnik. 9. ISBN 978-3-86359-191-5
- [372] STOCKINGER, M. Untersuchung von Methoden zur Zustandsüberwachung von Werkzeugmaschinenachsen mit Kugelgewindetrieb. Herzogenrath: Shaker Verlag, 2011. Berichte aus dem Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. 21. ISBN 978-3-8440-0053-5
- [373] KLEIN, W.H. Zustandsüberwachung von Rollen-Profilschienenführungen und Kugelgewindetrieben. Aachen: Apprimus Verlag, 2011. Edition Wissenschaft - Apprimus. 12. ISBN 978-3-86359-029-1
- [374] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN 69051-2:1989-05, Werkzeugmaschinen; Kugelgewindetriebe; Nenndurchmesser und Nennsteigungen. Berlin: Beuth Verlag
- [375] FENG, G.-H. und Y.-L. PAN. Investigation of ball screw preload variation based on dynamic modeling of a preload adjustable feed-drive system and spectrum analysis of ball-nuts sensed vibration signals [online]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 52(1), 85-96. ISSN 08906955. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ijmachtools.2011.09.008
- [376] PLAPPER, V. Steuerungsintegrierte Überwachung von Vorschubantrieben an Werkzeugmaschinen. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2004
- [377] SALINAS, L., V. OGLODIN und P. KLEMM. Konzept zur steuerungsinternen vorbeugenden Maschinendiagnose. Automatisiertes modellgestütztes Verfahren und zugehörige Steuerungsarchitektur zur Überwachung, Analyse und Diagnose von Maschinen und Fertigungsanlagen. wt Werkstattstechnik online, 2010, (5), 373-379

- [378] IMIELA, J. Verfügbarkeitssicherung von Werkzeugmaschinenachsen mit Kugelgewindetrieb durch modellbasierte Verschleissüberwachung. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH, 2006. Berichte aus dem IFW. 1. ISBN 978-3-939026-04-4
- [379] ZHOU, Y., X. MEI, Y. ZHANG, G. JIANG und N. SUN. Current-based Feed Axis Condition Monitoring and Fault Diagnosis. In: *IEEE International Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2009, S. 1191-1195. ISBN 978-1-4244-2799-4
- [380] MAIER, D. Sensorlose online Zustandserfassung von Vorschubantriebskomponenten in Werkzeugmaschinen. Stuttgart: IMA, 2015. Berichte aus dem Institut für Maschinenelemente. 157. ISBN 978-3-936100-58-7
- [381] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN ISO 3408-1, Kugelgewindetriebe - Teil 1: Begriffe und Bezeichnungssystem. Berlin: Beuth Verlag
- [382] BRECHER, C., W. HERFS, D. ÖZDEMIR, M. OBDENBUSCH, J. NITTINGER, F. WELLMANN, M. KÖNIGS, C. KRELLA und S. SITTIG. Die vernetzte Werkzeugmaschine. In: G. REINHART, Hg. Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2017, S. 341-378. ISBN 978-3-446-44642-7
- [383] MICHOS, G. Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen. Bamberg: Meisenbach Verlag, 2005. Fertigungstechnik - Erlangen. 165. ISBN 3-87525-230-6
- [384] SPUR, G. Handbuch Spanen und Abtragen. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014. ISBN 978-3-446-42826-3
- [385] LEE, W.G., J.W. LEE, M.S. HONG, S.-H. NAM, Y. JEON und M.G. LEE. Failure Diagnosis System for a Ball-Screw by Using Vibration Signals [online]. *Shock and Vibration*, 2015, **2015**(9), 1-9. ISSN 1070-9622. Verfügbar unter: doi:10.1155/2015/435870
- [386] UHLMANN, E., A. LAGHMOUCHI, R. EHRENPFORDT, E. HOHWIELER und C. GEISERT. Intelligentes Elektroniksystem für Condition Monitoring in Industrie 4.0 [online]. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 2016, 111(12), 855-857. Verfügbar unter: doi:10.3139/104.111641

- [387] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN ISO 20816-1, Mechanische Schwingungen - Messung und Bewertung der Schwingungen von Maschinen - Teil 1: Allgemeine Anleitungen. Berlin: Beuth Verlag
- [388] WALTHER, M. Antriebsbasierte Zustandsdiagnose von Vorschubantrieben. Heimsheim: Jost-Jetter, 2011. ISW/IPA Forschung und Praxis. 183. ISBN 978-3-939890-77-5
- [389] PLAPPER, V. und M. WECK. Sensorless Machine Tool Condition Monitoring based on open NCs. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2001, S. 3104-3108
- [390] HOLOVATYY, A., V. TESLYUK, M. IWANIEC und M. MASHEVSKA. Development of a system for monitoring vibration accelerations based on the raspberry pi microcomputer and the ADXL345 accelerometer [online]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, **6**(9 (90)), 52-62. ISSN 1729-3774. Verfügbar unter: doi:10.15587/1729-4061.2017.116082
- [391] ONUORAH, C.A., S. CHAYCHIAN, Y. SUN und J. SIAU. Development of a Vibration Measurement Device based on a MEMS Accelerometer. In: International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems (VEHITS), 2017, S. 293-299. ISBN 978-989-758-242-4
- [392] LEHRSTUHL FÜR FERTIGUNGSAUTOMATISIERUNG UND PRODUKTIONSSYSTEMATIK, FRIEDRICH-ALEXANDER-UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG. EFRE E|ASY OPT: Kompetenz- und Analyseprojekt für die Prozess- und Produktionsoptimierung mittels Data Mining [online] [Zugriff am: 28. Januar 2018]. Verfügbar unter: https://www.faps.fau.de/curforsch/efre-easy-opt/
- [393] PROAKIS, J.G. und D.G. MANOLAKIS. *Digital Signal Processing*. 4. Auflage: Pearson/Prentice Hall, 2007. ISBN 978-0-131-87374-2
- [394] MERTINS, A. *Signaltheorie*. 2. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010. ISBN 978-3-8348-9381-9
- [395] ZHOU, Y., H. XU, J. LIU und Y. ZHANG. On-line backlash-based feed-axis wear condition monitoring technology. In: *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 2014, S. 1434-1439. ISBN 978-1-4799-3979-4

- [396] VOGL, G.W., M. CALAMARI, S. YE und M.A. DONMEZ. A Sensor-based Method for Diagnostics of Geometric Performance of Machine Tool Linear Axes [online]. *Procedia Manufacturing*, 2016, **5**, 621-633. ISSN 2351-9789. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.promfg.2016.08.051
- [397] HOYER, P.O. Non-negative Matrix Factorization with Sparseness Constraints. *Journal of Machine Learning Research*, 2004, **5**, 1457-1469
- [398] BERRY, M.W., M. BROWNE, A.N. LANGVILLE, V.P. PAUCA und R.J. PLEMMONS. Algorithms and Applications for Approximate Nonnegative Matrix Factorization [online]. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2007, **52**(1), 155-173. ISSN 0167-9473. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.csda.2006.11.006
- [399] LEE, D.D. und H.S. SEUNG. Algorithms for Non-negative Matrix Factorization. In: *International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS)*. Cambridge: MIT Press, 2000, S. 535-541
- [400] LE ROUX, J., F. WENINGER und J.R. HERSHEY. Sparse NMF half-baked or well done?: Mitsubishi Electric Research Laboratories, 2015
- [401] BISHOP, C.M. Pattern Recognition and Machine Learning. 8. Auflage. New York: Springer, 2009. Information Science and Statistics. ISBN 978-0-387-31073-2
- [402] REYNOLDS, D.A. Gaussian Mixture Models. In: *Encyclopedia of Biometrics*, 2009. ISBN 978-0-387-73003-5
- [403] ZHOU, L. Indexing and Knowledge Discovery of Gaussian Mixture Models and Multiple-Instance Objects. Ludwig-Maximilians-Universität München, 2018
- [404] DEGROOT, M.H. und M.J. SCHERVISH. *Probability and statistics*. 4. Auflage. Boston: Pearson, 2012. ISBN 978-0-321-50046-5
- [405] PIERCE, J.R. *An Introduction to Information Theory. Symbols, Signals and Noise.* 2. Auflage. New York: Dover, 1997. Dover books explaining science. ISBN 978-0-486-24061-9

- [406] VINARICKY, E. Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen. Grundlagen, Technologien, Prüfverfahren. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002. ISBN 978-3-642-56237-2
- [407] HOFMANN, H., J. SPINDLER und H. FISCHER. Werkstoffe in der Elektrotechnik. Grundlagen, Aufbau, Eigenschaften, Prüfung, Anwendung, Technologie. 7. Auflage. München: Hanser Verlag, 2013. Hanser eLibrary. ISBN 978-3-446-43220-8
- [408] XING, B., Y. XIAO, Q.H. QIN und H. CUI. Quality assessment of resistance spot welding process based on dynamic resistance signal and random forest based [online]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 94(1-4), 327-339. ISSN 0268-3768. Verfügbar unter: doi:10.1007/s00170-017-0889-6
- [409] XU, G., J. WEN, C. WANG und X. ZHANG. Quality Monitoring for Resistance Spot Welding using Dynamic Signals. In: *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, 2009, S. 2495-2499. ISBN 978-1-4244-2692-8
- [410] SUBRAMANIAN, D., G.K. DONGARKAR, M. DAS, V. FERNANDEZ und G. GRZADZINSKY. Real Time Monitoring and Quality Control of Resistance Spot Welds using Voltage, Current, and Force Data. In: *IEEE Electro-Information Technology Conference (EIT)*, 2004, S. 211-220. ISBN 978-0-7803-8750-8
- [411] WANG, X., Y. LI und G. MENG. Monitoring of resistance spot weld quality using electrode vibration signals [online]. *Measurement Science and Technology*, 2011, 22(4), 45705. ISSN 0957-0233. Verfügbar unter: doi:10.1088/0957-0233/22/4/045705
- [412] SPRENG, S., F. RISCH, T. GLÄßEL, J. WOLFF und J. FRANKE. Evaluation of Energy Efficient Joining Processes in the Field of Electric Drives Manufacturing Considering Quality Aspects. In: *IEEE International Electric Drives Production Conference* (E|DPC), 2014, S. 1-7. ISBN 978-1-4799-5009-6
- [413] SPRENG, S., T. GLÄßEL, J. MUSELMANN, M. WÖRRLEIN und J. FRANKE. Quantification of the influence of varying electrode shapes and materials on the thermo-crimping process of standar-dized tubular cable lugs. In: *IEEE International Electric Drives Production Conference (E|DPC)*, 2016, S. 48-51. ISBN 978-1-5090-2909-9

- [414] SPRENG, S., T. GLÄßEL, S. HÖTZEL, H. SCHÄFER, D. WUNDER und J. FRANKE. Evaluation of the influence of varying electrode materials within the thermo-crimping process. In: *IEEE International Electric Drives Production Conference (E|DPC)*, 2015, S. 1-6. ISBN 978-1-4673-7512-2
- [415] PETERSON, L.L. und B.S. DAVIE. *Computernetze. Ein modernes Lehrbuch.* Heidelberg: dpunkt.verlag, 2000. ISBN 3-932588-69-X
- [416] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE. Forschungsagenda Industrie 4.0 Aktualisierung des Forschungsbedarfs. Berlin, Oktober 2016
- [417] KECHER, C., A. SALVANOS und R. HOFFMANN-ELBERN. *UML* 2.5. *Das umfassende Handbuch*. 6. Auflage. Bonn: Rheinwerk Verlag, 2018. Rheinwerk Computing. ISBN 978-3-8362-6018-3
- [418] RUMPE, B. *Modellierung mit UML. Sprache, Konzepte und Methodik*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. Xpert.press. ISBN 978-3-642-22413-3

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] BOGNER, E., J. GÖTZ, H. FLEISCHMANN und J. FRANKE. Automatisierung von Overheadprozessen. Erschließung von Effizienzpotenzialen für Industrie 4.o. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 2015, **110**(7-8), 470-474. Verfügbar unter: doi.org/10.3139/104.111376
- [P2] FLEISCHMANN, H., P. GÖLZER, J. FRANKE und M. AMBERG. Kommunikation und Datenaustausch in Industrie 4.o. Anforderungen und Fähigkeiten propagierter Kommunikationsprotokolle. wt Werkstattstechnik online, 2015, 105(3), 84-89
- [P3] FLEISCHMANN, H., J. KOHL, M. SCHNEIDER und J. FRANKE. Intelligente Fehlerdiagnose in Industrie 4.o. Neue Möglichkeiten zur intelligenten Diagnose in der automatisierten Produktionslandschaft. wt Werkstattstechnik online, 2015, 105(3), 90-95
- [P4] KOHL, J., H. FLEISCHMANN und J. FRANKE. Intelligent Energy Profiling for Decentralized Fault Diagnosis of Automated Production Systems [online]. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, **805**, 73-78. ISSN 1662-7482. Verfügbar unter: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.805.73
- [P5] FLEISCHMANN, H., J. KOHL, A. BLANK, M. SCHACHT, J. FUCHS und J. FRANKE. Semantische Kommunikationsschnittstellen zur Zustandsüberwachung im Karosseriebau. Serviceorientierte Architekturen für die Maschinendiagnose in vernetzten Produktionssystemen. wt Werkstattstechnik online, 2016, 106(10), 699-704
- [P6] FLEISCHMANN, H., J. KOHL und J. FRANKE. A Modular Web Framework for Socio-CPS-Based Condition Monitoring. In: 2016 12th World Conference on Factory Communication Systems (WFCS). Piscataway, NJ: IEEE, 2016, S. 1-8. ISBN 978-1-5090-2339-4

- [P7] FLEISCHMANN, H., J. KOHL und J. FRANKE. A Reference Architecture for the Development of Socio-Cyber-Physical Condition Monitoring Systems. In: 2016 11th System of Systems Engineering Conference (SoSE). Piscataway, NJ: IEEE, 2016, S. 1-6. ISBN 978-1-4673-8727-9
- [P8] FLEISCHMANN, H., J. KOHL, J. FRANKE, A. REIDT, M. DUCHON und H. KRCMAR. Improving Maintenance Processes with Distributed Monitoring Systems. In: 2016 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). Piscataway, NJ: IEEE, 2016, S. 377-382. ISBN 978-1-5090-2870-2
- [P9] FLEISCHMANN, H., S. SPRENG, J. KOHL, D. KISSKALT und J. FRANKE. Distributed Condition Monitoring Systems in Electric Drives Manufacturing. In: 2016 6th International Electric Drives Production Conference (E|DPC). Piscataway, NJ: IEEE, 2016, S. 52-57. ISBN 978-1-5090-2908-2
- [P10] HOHMANN, J., B. KLEE, T. HARLAND und H. FLEISCHMANN. Predictive Maintenance als Schlüsselanwendung von Industrie 4.0 - Umfassender Blick auf die Produktion. *Industrieanzeiger*, 2016, 13, 36-37
- [P11] FLEISCHMANN, H., M. BROSSOG, M. BECK und J. FRANKE. Automated Generation of Human-Machine Interfaces in Electric Drives Manufacturing. In: 2017 7th International Electric Drives Production Conference (E|DPC). Piscataway, NJ: IEEE, 2017, S. 1-8. ISBN 978-1-5386-1069-5
- [P12] FLEISCHMANN, H. und J. FRANKE. Entwurf einer informationstechnischen Schnittstelle für die Fehlerdiagnose in Sozio-Cyber-Physischen Systemen [online]. 103-116 Seiten / aw&l Report, Bd. 1 (2017): S-CPS: Ressourcen-Cockpit für Sozio-Cyber-Physische Systeme, 2017. Verfügbar unter: doi:10.14464/awir.viio.109

- [P13] KÄSTLE, C., H. FLEISCHMANN, M. SCHOLZ, S. HÄRTER und J. FRANKE. Cyber-Physical Electronics Production. In: S. JESCHKE, C. BRECHER, H. SONG und D.B. RAWAT, Hg. *Industrial Internet of Things*. Cham: Springer International Publishing, 2017, S. 47-78. ISBN 978-3-319-42558-0
- [P14] FLEISCHMANN, H., D. KIßKALT, S. KRUSEMARK und J. FRANKE. An Information Processing Framework Facilitating the Implementation of Condition Monitoring in Cyber-Physical Systems [online]. *Applied Mechanics and Materials*, 2018, **882**, 75-80. ISSN 1660-9336. Verfügbar unter: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.882.75
- [P15] KIßKALT, D., H. FLEISCHMANN, S. KREITLEIN, M. KNOTT und J. FRANKE. A novel approach for data-driven process and condition monitoring systems on the example of mill-turn centers [online]. *Production Engineering*, 2018, **5**(1), 519. ISSN 0944-6524. Verfügbar unter: doi:10.1007/S11740-018-0797-0

Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten*

- [S1] SCHNEIDER, M., H. FLEISCHMANN und J. FRANKE.

 Entwicklung und Implementierung eines cyber-physischen Diagnosesystems. Masterarbeit. Erlangen, 2014
- [S2] BECK, M., H. FLEISCHMANN und J. FRANKE. Konzeption und Entwicklung eines Diagnose-Frameworks im Kontext cyber-physischer Systeme. Bachelorarbeit. Erlangen, 2015
- [S3] FUCHS, P., H. FLEISCHMANN und J. FRANKE. Potentials of Diagnosis Systems and Predictive Maintenance of Production Systems under the Perspective of Industry 4.0. Bachelorarbeit. Erlangen, 2015
- [S4] JABARI, J., H. FLEISCHMANN und J. FRANKE. Konzeption und Weiterentwicklung eines webbasierten Diagnoseframeworks.
 Projektarbeit. Erlangen, 2015
- [S5] SCHMIDT, D., H. FLEISCHMANN und J. FRANKE. Conception, development and realization of a sensor platform for predictive maintenance applications. Projektarbeit. Erlangen, 2015
- [S6] SCHUHBÄCK, S., H. FLEISCHMANN und J. FRANKE. *Implementation of an OPC UA Server for a SoC Maintenance Application*. Projektarbeit. Erlangen, 2015
- [S7] TRÖSTER, M., H. FLEISCHMANN und J. FRANKE. Konzeption und Entwicklung eines cloudbasierten Frameworks für die technische Diagnose. Bachelorarbeit. Erlangen, 2015
- [S8] WEDIG, J.-N., H. FLEISCHMANN und J. FRANKE. Untersuchung und Evaluierung von Werkzeugen und Methoden zur vorausschauenden Instandhaltung in Produktionssystemen im Kontext von Big Data und Data Mining. Projektarbeit. Erlangen, 2015

- [S9] BECK, M., H. FLEISCHMANN und J. FRANKE. Entwicklung einer RAMI 4.0-konformen Visualisierungskomponente für die Zustandsüberwachung im Internet der Dinge und Dienste. Projektarbeit. Erlangen, 2016
- [S10] DRÜEKE, B., H. FLEISCHMANN und J. FRANKE. Konzeption, Entwicklung und Implementierung eines OPC UA-Clients für die Instandhaltung. Masterarbeit. Erlangen, 2016
- [S11] FUCHS, J., H. FLEISCHMANN und J. FRANKE. Konzeption und Entwicklung eines OPC UA-Servers für ein webbasiertes Condition Monitoring System im Kontext von Industrie 4.0. Projektarbeit. Erlangen, 2016
- [S12] KIßKALT, D., H. FLEISCHMANN und J. FRANKE. Konzeption, Entwicklung und Implementierung eines OPC UA-basierten Condition Monitoring Systems auf Basis von MATLAB. Projektarbeit. Erlangen, 2016
- [S13] KONOPKA, D., H. FLEISCHMANN und J. FRANKE. Konzeption und Entwicklung eines Informationsmodells auf Basis semantischer Technologien am Beispiel cyber-physischer Produktionsanlagen. Masterarbeit. Erlangen, 2016
- [S14] KRAUSE, W., H. FLEISCHMANN und J. FRANKE. Systematische Analyse aktueller Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich der vorausschauenden Instandhaltung im Kontext von Industrie 4.0. Masterarbeit. Erlangen, 2016
- [S15] KRUSEMARK, S., H. FLEISCHMANN und J. FRANKE. Entwicklung einer OPC UA-basierten Condition Monitoring-Plattform zur flexiblen Informationsverarbeitung in cyber-physischen Systemen. Masterarbeit. Erlangen, 2016
- [S16] MUTZL, F., H. FLEISCHMANN und J. FRANKE. Untersuchung von Industrie 4.0 Kommunikationsstandards zur Realisierung einer webbasierten Betriebsüberwachung. Projektarbeit. Erlangen, 2016

- [S17] SCHUHBÄCK, S., H. FLEISCHMANN und J. FRANKE. Konzeption und Umsetzung von Industrie 4.0 Kommunikation über PROFINET am Use Case Condition Monitoring. Masterarbeit. Erlangen, 2016
- [S18] WAGNER, M., H. FLEISCHMANN und J. FRANKE. Konzeption, Entwicklung und Realisierung eines Condition Monitoring Systems für Zerspanungsmaschinen. Projektarbeit. Erlangen, 2016
- [S19] WEDIG, J.-N., H. FLEISCHMANN und J. FRANKE. Konzeption der Mensch-Maschine-Schnittstelle eines vernetzten Instandhaltungssystems. Masterarbeit. Erlangen, 2016
- [S20] XIE, M., H. FLEISCHMANN und J. FRANKE. Konzeption von Bibliotheken zur Implementierung eines interoperablen, cyber-physischen Produktionssystems. Masterarbeit. Erlangen, 2016
- [S21] BRANDL, D., H. FLEISCHMANN und J. FRANKE. Organisation und Prozesse der Gewährleistung im Zeitalter der Industrie 4.o. Masterarbeit. Erlangen, 2017
- [S22] FUCHS, J., H. FLEISCHMANN und J. FRANKE. Modellierung von semantischen Informationsmodellen für Fügetechnologien im Karosseriebau und konzeptuelle Entwicklung eines .NET-basierten OPC UA-Clients. Masterarbeit. Erlangen, 2017
- [S23] GIES, S., H. FLEISCHMANN und J. FRANKE. Konzeption und Entwicklung eines Condition Monitoring Systems für Vorschubachsen auf Basis von Drehmoment- und Umkehrspielmessungen. Bachelorarbeit. Erlangen, 2017
- [S24] GRÜNSTEUDEL, H., H. FLEISCHMANN und J. FRANKE. Entwicklung semantischer Informationsmodelle für die Zustandsund Prozessüberwachung in cyber-physischen Systemen. Masterarbeit. Erlangen, 2017

- [S25] JABARI, J., H. FLEISCHMANN und J. FRANKE. Konzeption, Entwicklung und Validierung eines modularisierten Frameworks zur generischen Zustandsüberwachung sozio-cyber-physischer Systeme. Masterarbeit. Erlangen, 2017
- [S26] KIßKALT, D., H. FLEISCHMANN und J. FRANKE. Entwicklung eines verteilten Condition Monitoring Systems am Beispiel von Fräs-Dreh-Zentren und Heißcrimpanlagen. Masterarbeit. Erlangen, 2017
- [S27] MUßBACH, M., H. FLEISCHMANN und J. FRANKE. Analyse der Potentiale von cyber-physischen Systemen im Bereich der Zustandsüberwachung. Masterarbeit. Erlangen, 2017
- [S28] SCHRAMPFER, S., H. FLEISCHMANN und J. FRANKE. Entwicklung und Implementierung von Modellidentifikationsalgorithmen auf Basis von Datenstromanalysesystemen. Masterarbeit. Erlangen, 2017
- [S29] BECK, M., H. FLEISCHMANN und J. FRANKE. Entwicklung einer Analysekomponente basierend auf den Methoden des maschinellen Lernens im Kontext sozio-cyber-physicher Systeme. Masterarbeit. Erlangen, 2018
- [S₃o] KNOTT, M., D. KIßKALT, H. FLEISCHMANN und J. FRANKE. Entwicklung eines Condition Monitoring Systems zur Komponentenüberwachung von Produktionsanlagen basierend auf maschinellen Lernverfahren. Masterarbeit. Erlangen, 2018

214

^{*} Der Autor an zweiter (und ggf. dritter) Stelle bezeichnet den bzw. die Betreuer der studentischen Arbeit und an letztgenannter Stelle den/die Lehrstuhlinhaber/in.

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2019): Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, www.mb.fau.de/diss/

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52 Fertigungstechnik – Erlangen ISSN 1431-6226 Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307 Fertigungstechnik – Erlangen ISSN 1431-6226 Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308 FAU Studien aus dem Maschinenbau ISSN 2625-9974 FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

FAPS Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und

Produktionssystematik

KTmfk Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
LFT Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LPT Lehrstuhl für Photonische Technologien

Band 1: Andreas Hemberger Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988. ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988. ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting Projektierung von Montagesystemen FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989. ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989. ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989. ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989. ISBN 3-446-15783-2. Band 7: Wolfgang Scholz Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989. ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989. ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990. ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990. ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990. ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990. ISBN 3-446-16112-0. Band 13: Frank Vollertsen Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab. 1990. ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO2-Hochleistungslasern LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab. 1991. ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991. ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991. ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991. ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991. ISBN 3-446-16454-5. Band 19: Arnold vom Ende Untersuchungen zum Biegeumforme mit elastischer Matrize LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991. ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab. 1991. ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991. ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991. ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT) FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991. ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 1991. ISBN 3-446-16593-2. Band 25: Christoph Thim Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller CO2 -Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992. ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann Entwicklung einer CAD/CAM-Prozeßkette für die Herstellung von Blechbiegeteilen LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und –schweißen: Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992. ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17242-4. Band 31: Hubert Reinisch Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung einer CO2-Hochleistungslaseranlage LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993. ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und –steuerung FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmann Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems für das Laserstrahlschneiden LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993. ISBN 3-446-17719-1. Band 37: Stephanie Abels Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993. ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit XeCl-Excimerlaserstrahlung LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994. ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995. ISBN 3-446-18241-1. Band 43: Werner Heckel Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995. ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf Zielkostenorientierte Montageplanung FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18412-0. Band 49: Wolfgang Greska Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID) FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995. ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995. ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996. ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996. ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern - Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab. 1996. ISBN 3-87525-075-3. Band 55: Henning Hanebuth Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1996. ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mit kooperierenden Robotern FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab. 1996. ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 1996. ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab. 1997. ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab. 1997. ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 1997. ISBN 3-87525-082-6. Band 61: Andreas Brand Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID) FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO2-Hochleistungslaseranlage LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 1997. ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab. 1997. ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab. 1997. ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programmoptimierung FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-091-5. Band 67: Klaus-Uwe Wolf Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulenwickeln FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab. 1997. ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus Laserstrahlumformen von Profilen LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab. 1997. ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer Adaptive Strahlführungen für CO2-Laseranlagen LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab. 1997. ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen in der automatisierten Montage FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab. 1997. ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab. 1997. ISBN 3-87525-097-4. Band 73: Volker Franke Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen für die Biegebearbeitung LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte Produktgestaltung elektronischer Baugruppen FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998. ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meßner Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile - Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab. 1998. ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab. 1998. ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab. 1998. ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab. 1998. ISBN 3-87525-103-2. Band 79: Elke Rauh Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab. 1998. ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung bei umformtechnischen Prozessen LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab. 1998. ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schuberth Regelung der Fokuslage beim Schweißen mit CO2-Hochleistungslasern unter Einsatz von adaptiven Optiken LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab. 1998. ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo Development and Implementation of Hierarchical Control Structures of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt
Effizienzsteigerung bei Demontage
und Recycling durch flexible
Demontagetechnologien und optimierte
Produktgestaltung
FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998. ISBN 3-87525-112-1. Band 85: Ralf Luchs Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998. ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID) FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999. ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1999. ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab. 1999. ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab. 1999. ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab. 1999. ISBN 3-87525-119-9. Band 91: Horst Arnet Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 1999. ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO2-Laserstrahlung LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 1999. ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P. Coremans Laserstrahlsintern von Metallpulver -Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab. 1999. ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999. ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 1999. ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab. 1999. ISBN 3-87525-128-8. Band 97: Gunter Beitinger Herstellungs- und Prüfverfahren für thermoplastische Schaltungsträger FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab. 1999. ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knoblach Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab. 1999. ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie elektronischer SMT-Bauelemente LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2000. ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk Simulationsbasierte Lebensdauervorhersage für Werkzeuge der Kaltmassivumformung LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab. 2000. ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000. ISBN 3-87525-137-7.

Band 102: Christian Hinsel Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab. 2000. ISBN 3-87525-138-5. Band 103: Stefan Bobbert Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000. ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer
Modulares Planungswerkzeug zum
Produktionsmanagement in der
Elektronikproduktion
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3.
Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet
zum effizienten Service von
Produktionssystemen
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-147-4.

Band 105: Thomas Hennige Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001. ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse LFT, 152 Seiten, 71 Bilder. 2001. ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-143-1. Band 108: Frank Pitter Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001. ISBN 3-87525-144-X.

Band 109: Markus Korneli Integration lokaler CAP-Systeme in einen globalen Fertigungsdatenverbund FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001. ISBN 3-87525-146-6.

Band 110: Burkhard Müller Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern -Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001. ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001. ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT) FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001. ISBN 3-87525-152-0. Band 114: Alexander Huber Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001. ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001. ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002. ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002. ISBN 3-87525-166-0. Band 120: Nicolas Tiesler Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, o Tab. 2002. ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel Prozeßkontrolle und -steuerung beim Laserstrahlschweißen mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002. ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf Thermoplastsubstraten für die MID-Technik LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen elektronischer Kontakte LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-170-9. Band 126: Stefan Kaufmann Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium für Komponenten der Optoelektronik LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente mit Diodenlaserstrahlung LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab. 2002. ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch 3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab. 2002. ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Formplatinen aus Aluminiumlegierungen LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab. 2002. ISBN 3-87525-174-1. Band 132: Matthias Negendanck Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe zum Laserstrahlschweißen LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab. 2002. ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis Integrierte Fertigung - Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab. 2002. ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab. 2002. ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID) FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2002. ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich Kostensimulation - Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer Produktionssysteme FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab. 2002. ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-185-7. Band 138: Andreas Licha Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab. 2003. ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab. 2003. ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph Durchgängige simulationsgestützte Planung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab. 2003. ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden Maßhaltigkeit für das Blechbiegen LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab. 2003. ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile - Materialeinfluss und Materialverhalten LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2003. ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien mit homogener Lichtlinie LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2003. ISBN 3-87525-196-2. Band 144: Andreas Kach Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen an Bauteilabweichungen LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 2004. ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl System- und Prozeßtechnik für das simultane Löten mit Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab. 2004. ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge- Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab. 2004. ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, o Tab. 2004. ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, o Tab. 2004. ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm Laserstrahljustieren mittels Aktoren-Entwicklung von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab. 2004. ISBN 3-87525-206-3. Band 150: Martino Celeghini Wirkmedienbasierte Blechumformung: Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab. 2004. ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab. 2004. ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab. 2005. ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer Massivumformen metallischer Kleinstteile bei erhöhter Prozesstemperatur LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab. 2005. ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab. 2005. ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab. 2005. ISBN 3-87525-218-7. Band 156: Frank Niebling Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlsintern metallischer Bauteile LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 2005. ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler Großserientauglichkeit trockenschmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2005. ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto Solution Approaches for Planning of Assembly Systems in Three-Dimensional Virtual Environments FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab. 2005. ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen auf der Basis flexibler Schaltungsträger FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab. 2005. ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2005. ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab. 2005. ISBN 3-87525-224-1. Band 162: Peter K. Kraus Plattformstrategien - Realisierung einer varianz- und kostenoptimierten Wertschöpfung FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, o Tab. 2005. ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessanalyse und -modellierung LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab. 2005. ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2005. ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2005. ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab. 2005. ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab. 2005. ISBN 3-87525-232-2. Band 168: Werner Enser Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 2005. ISBN 3-87525-233-0.

Band 169: Katrin Melzer Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab. 2005. ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab. 2006. ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtl Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab. 2006. ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab. 2006. ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, o Tab. 2006. ISBN 3-87525-240-3. Band 174: Alexander Hofmann Hybrides Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-251-4. Band 180: Yong Zhuo
Entwurf eines rechnergestützten
integrierten Systems für Konstruktion
und Fertigungsplanung räumlicher
spritzgegossener Schaltungsträger (3DMID)
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007.
ISPN 258 2 87525 252 8

ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang

Durchgängige Mitarbeiterinformation

zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-260-6. Band 185: Klaus Lamprecht Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatinen LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-268-2. Band 190: Joachim Hecht Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirkmedienbasierte Doppelblech-Umformung von Magnesiumlegierungen LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl

Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi Innenhochdruck-Umformen verstärkter Blech-Rahmenstrukturen LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff Untersuchung der Prozesseinflussgrößen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5 LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von Lötprozessen in der Elektronikproduktion FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze Automatisierte Montage von makromechatronischen Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetzsysteme FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-278-1. Band 196: Wolfgang Hußnätter Grundlegende Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur Modellierung von Fließortkurven bei erhöhten Temperaturen LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsatzgerechten elektronischen Baugruppen FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth Grundlegende Untersuchungen zum Excimerlaserstrahl-Abtragen unter Flüssigkeitsfilmen LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera Prozesstechnische Untersuchungen zum Rührreibschweißen metallischer Werkstoffe LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl Untersuchungen zur Erhöhung der Prozessrobustheit bei der Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten Laserstrahlfügeoperationen LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-287-3. Band 202: Andreas Schaller Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, o Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion

FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich Sensoriken zur Schwerpunktslagebestimmung der optischen Prozessemissionen beim Laserstrahltiefschweißen LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf Entwicklung eines agentenbasierten Steuerungssystems zur Materialflussorganisation im wandelbaren Produktionsumfeld FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder. 2009. ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster Laserdurchstrahlschweißen transparenter Polymerbauteile LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler Rührreibschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-295-8. Band 208: Uwe Vogt Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann Qualitative und quantitative Bewertung der Crashtauglichkeit von höchstfesten Stählen LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl Größeneffekte bei Biegeprozessen-Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlschweißen thermoplastischer Kunststoffe LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel Grundlegende Untersuchungen zum Kontaktzustand zwischen Werkstück und Werkzeug bei umformtechnischen Prozessen unter tribologischen Gesichtspunkten LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-307-8. Band 214: Stefan Geißdörfer Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-308-5. Band 219: Andreas Dobroschke Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 215: Christian Matzner Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betauung im Automobil FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-309-2. Band 220: Azhar Zam Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 216: Florian Schüßler Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-310-8. Band 221: Michael Rösch Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 217: Massimo Cojutti Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-312-2. Band 222: Thomas Rechtenwald Quasi-isothermes Laserstrahlsintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 218: Raoul Plettke Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-315-3. Band 223: Daniel Craiovan Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011.

ISBN 978-3-87525-324-5.

Band 224: Kay Wagner Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte Werkzeugoberflächen LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber Verbesserung der Prognosegüte des Versagens von Punktschweißverbindungen bei höchstfesten Stahlgüten LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuser Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften: Temperierte Umformwerkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimulation und funktionale Untersuchung LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak Material Adapted Design of Cold Forging Tools Exemplified by Powder Metallurgical Tool Steels and Ceramics LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz Beschleunigte Simulation des Laserstrahlumformens von Aluminiumblechen LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-333-7. Band 229: Alexander Grimm Prozessanalyse und -überwachung des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kaupper Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegbarkeit LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß Modellbasierte Prozessauslegung für die Kaltmassivumformung unter Brücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID) FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-342-9. Band 234: Florian Albert Automatisiertes Laserstrahllöten und -reparaturlöten elektronischer Baugruppen LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler Prozessdynamik beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche im Überlappstoß LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger Seriennahe Auslegung der Prozesskette zur wärmeunterstützten Umformung von Aluminiumblechwerkstoffen LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-350-4. Band 239: Rajesh Kanawade In-vivo Monitoring of Epithelium Vessel and Capillary Density for the Application of Detection of Clinical Shock and Early Signs of Cancer Development LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidclinchverfahrens LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz und ultrakurz gepulster Laserstrahlung LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm Einfluss von Chargenschwankungen auf die Verarbeitungsgrenzen von Stahlwerkstoffen LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-357-3. Band 244: Christian Neudel Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften widerstandspunktgeschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-358-0. Band 249: Paul Hippchen Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 245: Anja Neumann Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-360-3. Band 250: Martin Zubeil Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-361-0. Band 251: Alexander Kühl Flexible Automatisierung der Statorenmontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 247: Erik Lamprecht
Der Einfluss der Fertigungsverfahren
auf die Wirbelstromverluste von
Stator-Einzelzahnblechpaketen für den
Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 252: Thomas Albrecht
Optimierte Fertigungstechnologien
für Rotoren getriebeintegrierter
PM-Synchronmotoren von
Hybridfahrzeugen
FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 248: Sebastian Rösel Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-363-4.

Band 253: Florian Risch Planning and Production Concepts for Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-369-6. Band 254: Markus Weigl Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder. 2014. ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-375-7. Band 259: Felix Lütteke Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock Analyse und Regelung des Laserstrahltiefschweißprozesses durch Detektion der Metalldampffackelposition LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-384-9. Band 264: Matthias Domke Transiente physikalische Mechanismen bei der Laserablation von dünnen Metallschichten LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz Community-basierte Optimierung des Anlagenengineerings FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen Qualifizierung des Potentials von Verfestigungseffekten zur Erweiterung des Umformvermögens aushärtbarer Aluminiumlegierungen LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert Erweiterung und Verbesserung von Versuchs- und Auswertetechniken für die Bestimmung von Grenzformänderungskurven LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus Erstellung eines Werkstofforientierten Fertigungsprozessfensters zur Steigerung des Formgebungsvermögens von Aluminiumlegierungen unter Anwendung einer zwischengeschalteten Wärmebehandlung LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-391-7. Band 269: Thomas Svec Untersuchungen zur Herstellung von funktionsoptimierten Bauteilen im partiellen Presshärtprozess mittels lokal unterschiedlich temperierter Werkzeuge LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader Grundlegende Untersuchungen zur Verschleißcharakterisierung beschichteter Kaltmassivumformwerkzeuge LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela Untersuchung von Magnetfeld-Messmethoden zur ganzheitlichen Wertschöpfungsoptimierung und Fehlerdetektion an magnetischen Aktoren FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland Entwicklung einer Methode zur Prognose adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen für das direkte Presshärten LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-396-2. Band 274: Michael Lechner
Herstellung beanspruchungsangepasster
Aluminiumblechhalbzeuge durch
eine maßgeschneiderte Variation der
Abkühlgeschwindigkeit nach
Lösungsglühen
LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 279: Fabian Zöller Erarbeitung von Grundlagen zur Abbildung des tribologischen Systems in der Umformsimulation LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 275: Kolja Andreas Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim Kaltfließpressen LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-398-6. Band 280: Christian Hezler Einsatz technologischer Versuche zur Erweiterung der Versagensvorhersage bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten Stählen LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 276: Marcus Baum Laser Consolidation of ITO Nanoparticles for the Generation of Thin Conductive Layers on Transparent Substrates LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-399-3. Band 281: Jochen Bönig Integration des Systemverhaltens von Automobil-Hochvoltleitungen in die virtuelle Absicherung durch strukturmechanische Simulation FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 277: Thomas Schneider Umformtechnische Herstellung dünnwandiger Funktionsbauteile aus Feinblech durch Verfahren der Blechmassivumformung LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-401-3. Band 282: Johannes Kohl Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexibelen Fabrik FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 278: Jochen Merhof Sematische Modellierung automatisierter Produktionssysteme zur Verbesserung der IT-Integration zwischen Anlagen-Engineering und Steuerungsebene FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-402-0. Band 283: Peter Bechtold Mikroschockwellenumformung mittels ultrakurzer Laserpulse LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-407-5. Band 284: Stefan Berger Laserstrahlschweißen thermoplastischer Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit spezifischem Zusatzdraht LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Bornschlegl Methods-Energy Measurement - Eine Methode zur Energieplanung für Fügeverfahren im Karosseriebau FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow Erweiterung des Unternehmenscontrollings um die Dimension Energie FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung zyklisch-symmetrischer Bauteile mit Nebenformelementen durch Blechmassivumformung LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-411-2.

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann Beitrag zur Untersuchung der tribologischen Bedingungen in der Blechmassivumformung - Bereitstellung von tribologischen Modellversuchen und Realisierung von Tailored Surfaces LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-412-9. Band 289: Thomas Senner Methodik zur virtuellen Absicherung der formgebenden Operation des Nasspressprozesses von Gelege-Mehrschichtverbunden LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein
Der grundoperationsspezifische
Mindestenergiebedarf als Referenzwert
zur Bewertung der Energieeffizienz in
der Produktion
FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, o Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-416-7.

Band 292: Alexander Kahrimanidis Thermisch unterstützte Umformung von Aluminiumblechen LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-417-4.

Band 293: Jan Tremel Flexible Systems for Permanent Magnet Assembly and Magnetic Rotor Measurement / Flexible Systeme zur Montage von Permanentmagneten und zur Messung magnetischer Rotoren FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-419-8. Band 294: Ioannis Tsoupis Schädigungs- und Versagensverhalten hochfester Leichtbauwerkstoffe unter Biegebeanspruchung LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-420-4.

Band 295: Sven Hildering Grundlegende Untersuchungen zum Prozessverhalten von Silizium als Werkzeugwerkstoff für das Mikroscherschneiden metallischer Folien LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-422-8.

Band 296: Sasia Mareike Hertweck Zeitliche Pulsformung in der Lasermikromaterialbearbeitung – Grundlegende Untersuchungen und Anwendungen LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto Mechatronic Simulation Approach for the Process Planning of Energy-Efficient Handling Systems FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-424-2.

Band 298: Peer Stenzel Großserientaugliche Nadelwickeltechnik für verteilte Wicklungen im Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-425-9. Band 299: Mario Lušić Ein Vorgehensmodell zur Erstellung montageführender Werkerinformationssysteme simultan zum Produktentstehungsprozess FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus Hochpräzise adaptive Steuerung und Regelung robotergeführter Prozesse FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer Erzeugung von thermoplastischen Werkstoffverbunden mittels simultanem, intensitätsselektivem Laserstrahlschmelzen LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, o Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger Untersuchung einer thermisch unterstützten Fertigungskette zur Herstellung umgeformter Bauteile aus der höherfesten Aluminiumlegierung EN AW-7020 LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellin Design of Manufacturing Processes for the Cold Bulk Forming of Small Metal Components from Metal Strip LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-430-3. Band 304: Bassim Bachy
Experimental Investigation, Modeling,
Simulation and Optimization of Molded
Interconnect Devices (MID) Based on
Laser Direct Structuring (LDS) / Experimentelle Untersuchung, Modellierung,
Simulation und Optimierung von Molded
Interconnect Devices (MID) basierend
auf Laser Direktstrukturierung (LDS)
FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 309: Martin Müller Untersuchung des kombinierten Trennund Umformprozesses beim Fügen artungleicher Werkstoffe mittels Schneidclinchverfahren LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 305: Michael Spahr Automatisierte Kontaktierungsverfahren für flachleiterbasierte Pkw-Bordnetzsysteme FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-432-7. Band 310: Christopher Kästle Qualifizierung der Kupfer-Drahtbondtechnologie für integrierte Leistungsmodule in harschen Umgebungsbedingungen FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 306: Sebastian Suttner Charakterisierung und Modellierung des spannungszustandsabhängigen Werkstoffverhaltens der Magnesiumlegierung AZ31B für die numerische Prozessauslegung LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-433-4. Band 311: Daniel Vipavc Eine Simulationsmethode für das 3-Rollen-Schubbiegen LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

Band 307: Bhargav Potdar A reliable methodology to deduce thermo-mechanical flow behaviour of hot stamping steels LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-436-5. Band 312: Christina Ramer Arbeitsraumüberwachung und autonome Bahnplanung für ein sicheres und flexibles Roboter-Assistenzsystem in der Fertigung FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

Band 308: Maria Löffler Steuerung von Blechmassivumformprozessen durch maßgeschneiderte tribologische Systeme LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-133-1. Band 313: Miriam Rauer Der Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen von Hochleistungs-Leuchtdioden FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-157-7. Band 314: Felix Tenner

Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche

LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

Band 315: Aarief Syed-Khaja Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab. 2018. ISBN 978-3-87525-162-1.

Band 316: Adam Schaub

Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

Band 317: Daniel Gröbel

Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

Band 318: Philipp Hildenbrand

Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess

LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-174-4.

Band 319: Tobias Konrad

Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserierohbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen

LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-176-8.

Band 320: David Meinel

Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-184-3.

Band 321: Andrea Zimmermann

Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivungeformter Bauteile

LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-190-4.

Band 322: Christoph Amann

Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-194-2.

Band 323: Jennifer Tenner

Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen

LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

Band 324: Susan Zöller

Mapping Individual Subjective Values to Product Design

KTmfk, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-202-4.

Band 325: Stefan Lutz Erarbeitung einer Methodik zur semiempirischen Ermittlung der Umwandlungskinetik durchhärtender Wälzlagerstähle für die Wärmebehandlungssimulation LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnibl Modellbasierte Prozesskettenabbildung rührreibgeschweißter Aluminiumhalbzeuge zur umformtechnischen Herstellung höchstfester Leichtbaustrukturteile LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab.

2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

Band 327: Johannes Bürner Technisch-wirtschaftliche Optionen zur Lastflexibilisierung durch intelligente elektrische Wärmespeicher FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-219-2.

Band 328: Wolfgang Böhm Verbesserung des Umformverhaltens von mehrlagigen Aluminiumblechwerkstoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer Grundsatzuntersuchungen, mathematische Modellierung und Ableitung einer Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe nach dem Spinnenbeinprinzip LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-229-1. Band 330: Stephan Rapp Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung transienter optischer Materialeigenschaften bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-235-2.

Band 331: Michael Scholz Intralogistics Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-237-6.

Band 332: Eva Bogner Strategien der Produktindividualisierung in der produzierenden Industrie im Kontext der Digitalisierung FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-246-8.

Band 333: Daniel Benjamin Krüger Ein Ansatz zur CAD-integrierten muskuloskelettalen Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-250-5.

Band 334: Thomas Kuhn Qualität und Zuverlässigkeit laserdirektstrukturierter mechatronisch integrierter Baugruppen (LDS-MID) FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab. 2019. ISBN: 978-3-96147-252-9 Band 335: Hans Fleischmann Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme FAPS, xi u.214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab. 2019. ISBN: 978-3-96147-256-7

Abstract

Within the scope of the fourth industrial revolution, Industry 4.0, the manufacturing industry is trying to optimize the traditional target figures of quality, costs and time as well as resource efficiency, flexibility, adaptability and resilience in volatile global markets. The focus is on the development of smart factories, in which relevant objects and humans are interconnected. Cyber-physical systems (CPS) are used as sensorized and actuatorized, resilient and intelligent overall systems to control production processes, machines and product quality. The technical complexity of production systems and their associated maintenance processes are rising due to the demands on their adaptability and the increasing automation. Challenges in the development and implementation of CPS include the lack of interoperability and reference architecture concepts as well as the insufficiently defined interaction of people and CPS.

Socio-cyber-physical systems (Socio-CPS) focus on bidirectional interaction of humans and CPS to address this problem. The scope and objective of this dissertation is to define Socio-CPS in the condition and process monitoring of smart factories. This dissertation utilizes scenarios of Socio-CPS, holistically defines system architectures and validates the solutions developed in industrial applications. The successful implementation of Socio-CPS in three heterogeneous validation scenarios proves the correctness and applicability of the solutions.

Die produzierende Industrie strebt im Rahmen der vierten industriellen Revolution, Industrie 4.0, die Optimierung der klassischen Zielgrößen Qualität, Kosten und Zeit sowie Ressourceneffizienz, Flexibilität, Wandlungsfähigkeit und Resilienz in globalen, volatilen Märkten an. Im Mittelpunkt steht die Entwicklung von Smart Factories, in denen sich relevante Objekte, Produktions-, Logistik- und Informationssysteme sowie der Mensch vernetzen. Cyber-physische Systeme (CPS) tragen als sensorisierte und aktorisierte, resiliente und intelligente Gesamtsysteme dazu bei, Produktionsprozesse und -maschinen sowie die Produktqualität zu kontrollieren. Vordergründig wird die technische Komplexität von Produktionssystemen und damit auch zugehöriger Instandhaltungsprozesse durch die Anforderungen an deren Wandlungsfähigkeit und den zunehmenden Automatisierungsgrad ansteigen. Herausforderungen bei der Entwicklung und Implementierung von CPS liegen in fehlenden Interoperabilitätsund Referenzarchitekturkonzepten sowie der unzureichend definierten Interaktion von Mensch und CPS begründet.

Sozio-cyber-physische Systeme (Sozio-CPS) fokussieren die bidirektionale Interaktion von Mensch und CPS und adressieren diese Problemstellung. Gegenstand und Zielstellung dieser Dissertationsschrift ist die Definition von Sozio-CPS in der Domäne der Zustands- und Prozessüberwachung von Smart Factories. Untersucht werden dabei Nutzungsszenarien von Sozio-CPS, die ganzheitliche Formulierung von Systemarchitekturen sowie die Validierung der entwickelten Lösungsansätze in industriellen Anwendungsszenarien. Eine erfolgreiche Umsetzung von Sozio-CPS in drei heterogenen Validierungsszenarien beweist die Korrektheit und Anwendbarkeit der Lösungsansätze.

