

René Wöstmann

Konzeption einer Referenzarchitektur
für maschinelles Lernen in der
Prozessindustrie und exemplarische
Umsetzung in der Brauindustrie

Industrial Engineering | Band 37 (2023)

Konzeption einer Referenzarchitektur für maschinelles Lernen in der Prozessindustrie und exemplarische Umsetzung in der Brauindustrie

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

von der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund
genehmigte Dissertation

René Wöstmann, M.Sc.

aus
Osnabrück

Tag der mündlichen Prüfung: 01.12.2022

1. Gutachter/-in: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse
2. Gutachter/-in: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Norbert Gronau

Dortmund, 2022

Schriftenreihe Industrial Engineering
hrsg. von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse

Band 37

René Wöstmann

**Konzeption einer Referenzarchitektur für
maschinelles Lernen in der Prozessindustrie und
exemplarische Umsetzung in der Brauindustrie**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Düren 2023

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8892-2

ISSN 1867-1322

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

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

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

I. Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionssysteme der Technischen Universität Dortmund sowie am RIF Institut für Forschung und Transfer in den Jahren 2015 - 2022. Ich werde die Zeit stets in guter Erinnerung bewahren und habe insb. die Themen und Projekte rund um die Dissertation immer mit großer Freude vorangetrieben. Neben der inhaltlichen Natur der Arbeiten liegt dies vor allem an den Kollegen und Kolleginnen, mit denen ich in dieser Zeit zusammenarbeiten durfte.

Einerseits möchte ich mich ganz herzlich beim DaPro-Konsortium für die fachlichen Diskussionen, aber auch für die schönen Abende, Unternehmungen und Einsichten bedanken, die ich abseits des Projektes mit und durch euch erlangen durfte. Stellvertretend für das gesamte Projektteam möchte ich besonders Philipp Schlunder, Dominik Essig und Josef Kimberger hervorheben, von denen ich nicht nur sehr viel Data Science-bezogene Einsichten, sondern vor allem auch das Brauen aus erster Hand erlernen durfte.

Auch intern wäre es am Institut ohne tatkräftige Unterstützung niemals möglich gewesen, eine cyber-physische Versuchsbrauerei aufzubauen und zu betreiben. Mein besonderer Dank gilt daher unserem Team der ersten Stunde rund um Nikolai West, David Wagstyl und Marius Syberg für die tatkräftige Unterstützung im Brauen zahlreicher Sude, aber auch die fachlichen Diskussionen und vielen gemeinsamen Aktivitäten über die Jahre. Die Krönung wird unsere gemeinsame Reise nach Australien sein und ich bin zuversichtlich, dass das Labor in Zukunft in guten Händen liegt. Besonders hervorheben möchte ich in diesem Zusammenhang nicht weniger stark die exzellente Unterstützung von Thorbjörn Borggräfe und Sascha Janßen, ohne die der Aufbau insb. der digitalen Komponenten nicht möglich gewesen wäre.

Darüber hinaus gilt mein Dank den Kollegen des Instituts, mit denen ich seit nunmehr sieben Jahren zusammenarbeiten darf. Hervorheben möchte ich Julian Schallow und Jochen Hartung für die Unterstützung insb. zu Beginn meiner Zeit, Fabian Nöhring für die tolle Zusammenarbeit im STEPS-Projekt sowie André Barthelmey für die Inspiration im Themenfeld des Digitalen Zwillings. Auch mit euch verbinde ich viele schöne Momente abseits der Arbeit. Ebenfalls möchte ich mich sehr herzlich bei Ronny Zwinkau bedanken, der mich stets zum Verfassen der Arbeit motiviert und in kritischen Situationen den Rücken freigehalten hat.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Jochen Deuse für das Vertrauen und die damit verbundenen Freiheiten, die ich insb. seit der Übernahme der Leitung des Forschungsbereichs Digital Manufacturing genießen durfte. Ich hoffe, einen Teil dazu beigetragen zu haben, dass das Institut gut für die Zukunft aufgestellt ist. Ebenso möchte ich mich bei Prof. Norbert Gronau sehr herzlich für die Übernahme des Zweitberichts bedanken.

Zu guter Letzt möchte ich mich ebenfalls sehr herzlich bei meiner Familie, aber ganz besonders bei meiner Freundin Maren bedanken, die in den letzten beiden Jahren der Disseration auf viel gemeinsame Zeit an Wochenenden und Urlaubstagen verzichten musste und mich stets ermutigt und unterstützt hat. Ohne den Rückhalt wäre die Arbeit nicht möglich gewesen.

II. Inhaltsverzeichnis

I.	Vorwort.....	i
II.	Inhaltsverzeichnis.....	iii
III.	Abkürzungsverzeichnis.....	vi
IV.	Tabellen- und Abbildungsverzeichnis.....	xi
1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	2
1.2	Zielsetzung und Forschungsansatz.....	3
1.3	Vorgehensweise.....	5
2	Grundlagen	6
2.1	Prozessindustrie.....	6
2.1.1	Abgrenzung der Prozessindustrie.....	6
2.1.2	Produktivitätssteigerung in der Prozessindustrie	12
2.1.3	IT-Systeme in der Prozessindustrie.....	19
2.2	Maschinelles Lernen und Data Mining.....	28
2.2.1	Grundlegende Begrifflichkeiten und Vorgehensweisen.....	28
2.2.2	Lernverfahren und Aufgabenstellungen.....	32
2.2.3	Überwachtes Lernen	34
2.2.4	Unüberwachtes Lernen	40
2.2.5	Semi-überwachtes Lernen.....	46
2.2.6	Bestärkendes Lernen	46
2.2.7	Anwendungsgebiete in der Produktion	47
2.3	Industrie 4.0 und Internet of Things.....	48
2.3.1	Grundlegende Begrifflichkeiten und Zusammenhänge	48
2.3.2	Embedded Systems und Edge Devices.....	49
2.3.3	Industrial Internet of Things und Referenzarchitekturen	52
2.3.4	Schnittstellen und Protokolle	56
2.4	Zusammenfassung und Handlungsbedarf	59
3	Stand der Forschung.....	62
3.1	Maschinelles Lernen in der Prozessindustrie.....	62
3.1.1	Anwendungsgebiete von maschinellem Lernen in der Prozessindustrie	62

3.1.2	Verbreitete Verfahren und Algorithmen in der Prozessindustrie	64
3.2	Architekturen für maschinelles Lernen.....	65
3.2.1	Software-Architekturen und -Frameworks	65
3.2.2	Machine Learning Operations	69
3.2.3	Anwendungsgetriebene Architekturen.....	71
3.3	Zusammenfassung und Konkretisierung der Forschungslücke.....	80
4	Konzeption einer Referenzarchitektur für maschinelles Lernen in der Prozessindustrie	82
4.1	Zielsetzung und Spezifizierung des Referenzarchitektur-Typs	84
4.1.1	Zielsetzung.....	84
4.1.2	Spezifizierung des Referenzarchitektur-Typs	84
4.2	Auswahl und Analyse der Informationsquellen	85
4.2.1	Identifikation von Quellen und Personen	85
4.2.2	Dokumentation und Aufnahme der Informationen	86
4.2.3	Definition von Stakeholdern.....	87
4.3	Anforderungsdefinition	89
4.3.1	Inhaltliche Anforderungen	89
4.3.2	Grobkonzept des Aufbaus.....	91
4.4	Aufbau der Architektur.....	91
4.5	Sicht I: Ausprägung der Ebenen.....	95
4.5.1	Asset.....	95
4.5.2	IT Systems	98
4.5.3	Edge Device.....	101
4.5.4	Network Infrastructure and Databases	104
4.5.5	Machine Learning.....	107
4.5.6	Application	124
4.6	Sicht II: Nutzung der Architektur	125
4.6.1	Business Understanding	126
4.6.2	Data Understanding	127
4.6.3	Data Preparation	128
4.6.4	Modeling	129
4.6.5	Evaluation	130
4.6.6	Deployment.....	131
4.7	Diskussion und Zusammenfassung.....	132

5	Exemplarische Umsetzung und Validierung	133
5.1	ML-basierte Rezeptoptimierung in Cyber-Physischer Versuchsbrauerei	133
5.1.1	Asset.....	134
5.1.2	IT Systems	136
5.1.3	Edge Device.....	137
5.1.4	Network Infrastructure and Databases	139
5.1.5	Machine Learning.....	140
5.1.6	Application	146
5.2	Industrielle Umsetzung in der Getränkeindustrie	148
5.2.1	Asset.....	148
5.2.2	IT Systems	149
5.2.3	Network Infrastructure and Databases	149
5.2.4	Machine Learning.....	150
5.2.5	Application	151
5.3	Evaluation der Umsetzungen	152
5.4	Evaluation der übergeordneten Ziele durch Befragung von Stakeholdern	153
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	154
6.1	Zusammenfassung.....	154
6.2	Weiterer Forschungsbedarf	155
7	Anhang.....	157
7.1	Grundlagen und Stand der Technik.....	157
7.2	Konzeption der Referenzarchitektur	158
7.2.1	Device Management (Geräteverwaltung)	159
7.2.2	Decentral Data Acquisition and Pre-Processing	160
7.2.3	Decentral Data Storage (Dezentrale Datenspeicherung).....	161
7.2.4	Decentral Scoring (Dezentrale Ausführung von Scoring-Prozessen).....	162
7.3	Exemplarische Umsetzung und Validierung	163
7.4	Interviewstudie zur Evaluation der übergeordneten Ziele	170
8	Literaturverzeichnis	171

III. Abkürzungsverzeichnis

5G	5. Generation des Mobilfunks
6LoWPAN	IPv6 Low Power Wireless Personal Area Network
ABK	Anzeige- und Bedienkomponenten
API	Application Programming Interface (dt. Anwendungsschnittstelle)
APS	Advanced Planning and Scheduling
AMQP	Advanced Message Queuing Protocol
ANN	Artificial Neural Network (dt. KNN)
ANSI	American National Standards Institute
APICS	Association for Operations Management (ehemals: American Production and Inventory Control Society)
AUC	Area under the ROC Curve
BDE	Betriebsdatenerfassung (engl. Operational Data Akquisition, ODA)
BLE	Bluetooth Low Energy
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BPMN	Business Process Modeling Notation
bspw.	beispielsweise
CAM	Centre for Advanced Manufacturing an der UTS
CART	Classification and Regression Trees
CI/CD	Continuous Integration and Delivery bzw. Deployment
CIM	Computer Integrated Manufacturing
CIP	Computer Integrated Processing
CMMS	Computerized Maintenance Management-System
CoAP	Constrained Application Protocol
CPU	Central Processing Unit (dt. Prozessor)
CPS	Cyber-Physisches System
CPPS	Cyber-Physisches Produktionssystem
CRISP-DM	Cross Industry Standard Process for Data Mining
CRM	Customer Relationship Management
DaPro	Datengetriebene Prozessoptimierung mit Hilfe maschinellen Lernens in der Getränkeindustrie (Projekttitel)
DB	Datenbaustein
DBB	Deutscher Brauer-Bund

DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DMAIC	Define, Measure, Analyse, Improve, Control (Six Sigma-Vorgehensmodell)
DSET	Dempster Shafer Evidence Theory
dt.	deutsch
ebd.	ebenda
engl.	englisch
EPK	Ereignisgesteuerte Prozesskette
ERP	Enterprise Resource Planning
FA	Faktorenanalyse
FB	Funktionsbaustein
FC	Funktion
FDA	Food and Drug Administration
FDA	Fisher Discriminant Analysis
GB	Gigabyte
GMP	Good Manufacturing Practice
GPU	Graphics Processing Unit (dt. Grafikprozessor)
GPR	Gaussian Process Regression
GSM	Global System for Mobile Communications (2G)
HDFS	Hadoop Distributed File System
HMI	Human Machine Interface
HTTPS	Hypertext Transfer Protocol Secure
i. A. a.	in Anlehnung an
IaaS	Infrastructure-as-a-Service
IIC	Industrial Internet Consortium
iit	Insitut für Innovation und Technik in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH
IIoT	Industrial Internet of Things
IIRA	Industrial Internet Reference Architecture des IIC
IoT	Internet of Things
IoT-ARM	IoT-Architecture Reference Model
IPS	Instandhaltungsplanungs- und -steuerungssystem
IPv6	Internet Protocol Version 6
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
i. O.	in Ordnung

ISA	International Society of Automation
ISO	International Organization for Standardization
IT	Informationstechnik
insb.	insbesondere
IVRA	Industrial Value Chain Reference Architecture
JSON	JavaScript Object Notation
Kap.	Kapitel
KDD	Knowledge Discovery in Databases
KI	Künstliche Intelligenz
k-NN	k-Nearest Neighbours
KNN	Künstliches Neuronales Netz (engl. ANN)
KPI	Key Performance Indicator
LDA	Lineare Diskriminanzanalyse
LIMS	Labor-Informations- und Management-System
LLE	Locally Linear Embedding (dt. lokale lineare Einbettung)
LTE	Long Term Evolution (4G)
LVS	Lagerverwaltungssystem
M2M	Maschine zu Maschine (engl. Machine to Machine)
mA	Milliampere
MARS	Multivariate Adaptive Regression Splines
MBSE	Model-Based Systems Engineering
MDE	Maschinendatenerfassung
MDS	Multidimensionale Skalierung
MES	Manufacturing Execution System
MESA	Manufacturing Enterprise Solutions Association
ML	Maschinelles Lernen (engl. Machine Learning)
ML2KMU	Konzept zum Aufbau von Kompetenzen des maschinellen Lernens für Anlagenhersteller und produzierende KMU (Projekttitel)
MLOps	Machine Learning Operations
MLR	Multivariate Lineare Regression
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
Mrd.	Milliarden
MRP I	Material Requirements Planning

MRP II	Manufacturing Resources Planning
MSE	Mean Square Error (dt. Mittlere Fehlerquadratsumme)
NAMUR	Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie (ehemals: Normenarbeitsgemeinschaft für Mess- und Regeltechnik in der chemischen Industrie)
NFC	Near Field Communication
OB	Organisationsbaustein
OMG	Object Management Group
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture
PaaS	Platform-as-a-Service
PCA	Principal Component Analysis (dt. Hauptkomponentenanalyse)
PCS	Process Control System (dt. PLS)
PCR	Hauptkomponentenregression (engl. Principal Component Regression)
PFD	Process Flow Diagram (dt. Verfahrensfließschema)
PLC	Programmable Logic Controller (dt. SPS)
PLS	Prozessleitsystem
PLS	Partial Least Squares
PNK	Prozessnahe Komponente
POE	Programm-Organisationseinheit
PRG	Programm
ProdHaftG	Produkthaftungsgesetz
P&ID	Piping and Instrumentation Diagram (dt. R&I)
QoS	Quality of Service
R&I	Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema (engl. P&ID)
RAMI 4.0	Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0
RDBMS	Relationales Datenbankmanagementsystem
RFID	Radio Frequency Identification
RM	RapidMiner
RMSE	Root Mean Square Error (dt. Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme)
ROC	Receiver Operating Characteristics
RPL	IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks
RSS	Summe der quadrierten Abweichungen vom Schätzwert (engl. Residual Sum of Squares)
SaaS	Software-as-a-Service

SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SCM	Supply Chain Management
SI	Internationales Einheitensystem (französisch: Système international d'unités)
SOA	Serviceorientierte Architektur
SoC	System-on-a-Chip
SOM	Self-Organizing Map (dt. selbst-organisierende Karten)
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung (engl. PLC)
SQL	Structured Query Language
SVD	Singular Value Decomposition (dt. Singulärwertzerlegung)
SVM	Support Vector Machine
TCP	Transmission Control Protocol
TFX	TensorFlowExtended
TLS	Transport Layer Security
TPM	Total Productive Maintenance
TPU	Tensor Processing Unit
TQM	Total Quality Management
TSN	Time Sensitive Networks
u. a.	unter anderem
UDP	User Datagram Protocol
UML	Unified Modeling Language
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System (3G)
UTS	University of Technology Sydney
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
vgl.	vergleiche
VLB	Versuchs- und Lehranstalt für Brauerei in Berlin
VM	Virtuelle Maschine
WMS	Warehouse Management System (dt. LVS)
XMPP	Extensible Messaging and Presence Protocol
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V.

IV. Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 Aufbau der Arbeit.....	5
Abbildung 2-1 Charakterisierung der Branchen der Prozessindustrie i. A. a. (Friemann et al. 2015, S. 31; Krenn 2008, S. 20; Günther 2004, S. 327)	7
Abbildung 2-2 Gruppierung von Anlagenkomponenten nach (DIN EN ISO 10628-2:2012, S. 4–5) sowie exemplarisches Verfahrensfliesschema (Bindel und Hofmann 2016, S. 13).....	10
Abbildung 2-3 Kernmodelle der chargenorientierten Fahrweise i. A. a. (DIN EN 61512-1:2000-01; Mahnke et al. 2011, S. 4)	11
Abbildung 2-4 Betrachtungsgegenstand der Produktivität im Rahmen der vorliegenden Arbeit	13
Abbildung 2-5 Übersicht über die Gestaltungsparadigmen zur Produktivitätssteigerung.....	18
Abbildung 2-6 Ebenenmodell der IEC 62264-1 (links) sowie exemplarische Automatisierungspyramide (rechts) i. a. A. (IEC 62264-1:2013; DIN EN 62264-1:2014-07; VDI/VDE 2013; Meudt et al. 2017)	20
Abbildung 2-7 Marktstudie industrieller Netzwerkstrukturen 2019 i. A. a. (Breitkopf 2019)....	26
Abbildung 2-8 Integrationstendenzen von SPS und PLS i. A. a. (Felleisen 2001, S. 51).....	26
Abbildung 2-9 Charakteristika von Big Data i. A. a. (Gölzer 2017, S. 49; Klein et al. 2013, S. 320)	28
Abbildung 2-10 Vorgehensweisen des Data Minings nach CRISP-DM (Chapman et al. 2000, S. 10) (links) und KDD (Fayyad et al. 1996, S. 41)(rechts)	30
Abbildung 2-11 Verfahrensansätze und Aufgabenstellungen des maschinellen Lernens i. A. a. (Lieber 2018, S. 34)	32
Abbildung 2-12 Grundlegende Zusammenhänge i. A. a. (Flach 2012, S. 11; Lieber 2018, S. 42)	33
Abbildung 2-13 Grundprinzip der Support Vector Machine	35
Abbildung 2-14 Grundprinzip des k-Nearest Neighbors-Klassifikators	36
Abbildung 2-15 Grundprinzip künstlicher Neuronaler Netze (KNN).....	38
Abbildung 2-16 Konfusionsmatrix für eine binäre Klassifikation	39
Abbildung 2-17 Exemplarische Visualisierungsformen der explorativen Datenanalyse i. A. a. (Bromuri und Helms 2016; Chan 2006; Kotu und Deshpande 2019, 48 ff.)	44
Abbildung 2-18 Exemplarische Visualisierungsformen in Verbindungen mit ML-Verfahren i. A. a. (Lieber 2018, S. 223)	45
Abbildung 2-19 Anwendungsfelder von ML in der Produktion; n=72 (VDMA 2019b, S. 3)	47
Abbildung 2-20 Öffnung der Automatisierungspyramide durch CPPS i. A. a. (VDI/VDE 2013, S. 4)	48
Abbildung 2-21 Zusammenspiel von Embedded Systems und CPPS i. A. a. (Broy 2010b, S. 23; Lucke et al. 2014, S. 13; Barthelmey 2021)	50

Abbildung 2-22 Globaler Bedarf an Echtzeit-Datenverkehr (Statista 2018; Reinsel et al. 2018)	51
Abbildung 2-23 Kernperspektiven und -bestandteile des IIRA-Modells i. A. a. (Industrial Internet Consortium 2019)	54
Abbildung 2-24 Landkarte und Industrie 4.0-Komponente des RAMI 4.0 i. A. a. (DIN SPEC 91345:2016-04)	54
Abbildung 2-25 Kernperspektiven und -bestandteile der Open Fog-Referenzarchitektur i. A. a. (OpenFog Consortium 2017, S. 44)	55
Abbildung 2-26 Übersicht über die Bestandteile der Azure IoT-Referenzarchitektur i. A. a. (Microsoft 2018, S. 7)	56
Abbildung 2-27 Übersicht über IoT-Protokolle und Einordnung in OSI-Modell i. A. a. (Gerber und Romeo 2020)	56
Abbildung 2-28 Exemplarische MQTT-Strukturen i. A. a. (Lampkin et al. 2012, S. 26)	57
Abbildung 2-29 OPC UA-Architekturübersicht i. A. a. (Mahnke et al. 2009, S. 11; IEC/TR 62541-1:2020)	58
Abbildung 2-30 Gegenüberstellung bestehender IoT-Referenzarchitekturmodelle (eigene Darstellung) i. A. a. (Wöstmann et al. 2019a; Strauß et al. 2018; Barthelmey et al. 2018)	60
Abbildung 3-1 Überwachte maschinelle Lernverfahren in der Prozessindustrie i. A. a. (Ge et al. 2017, S. 20605)	64
Abbildung 3-2 Unüberwachte maschinelle Lernverfahren in der Prozessindustrie i. A. a. (Ge et al. 2017, S. 20599)	65
Abbildung 3-3 Übersicht über ML-Werkzeuge, -Frameworks und -Plattformen i. A. a. (Piatetsky-Shapiro 2019)	69
Abbildung 3-4 Umgebende Infrastrukturelemente zur Anwendung von ML i. A. a. (Sculley et al. 2015, S. 4)	70
Abbildung 3-5 Exemplarisches MLOps-Modell nach (Microsoft 2021a)	71
Abbildung 3-6 Architekturkonzept und Entscheidungsunterstützung nach (Bender und Grum 2016)	72
Abbildung 3-7 Big Data Solution Reference Architecture nach (Geerdink 2013, S. 74)	72
Abbildung 3-8 Gartner End-to-End ML- und Analytics-Architektur nach (Sapp 2017, S. 30)	73
Abbildung 3-9 Architektur zur Datenerhebung, -aggregation, -integration und Warehousing in heterogenen IT-Landschaften nach (Trunzer et al. 2017, S. 1109)	74
Abbildung 3-10 Übersicht über die MONSOON-Architektur (Sarnovsky et al. 2018, S. 5)	75
Abbildung 3-11 Architektur der Real-time Plant Operational und Cross-Sectional Data Lab Plattform	75
Abbildung 3-12 Gesamtüberblick über die Architektur (Kadlec und Gabrys 2009, S. 245)	77
Abbildung 3-13 Detailansicht Computational Path und Path Combination (Kadlec und Gabrys 2009, 247 f.)	77

Abbildung 3-14 Referenzarchitektur zur Qualitätsverbesserung in der Stahlproduktion (Arnu et al. 2017, S. 86).....	78
Abbildung 3-15 Vergleich bestehender Forschungsarbeiten mit den Zielen der vorliegen- den Arbeit	81
Abbildung 4-1 Vorgehensmodelle zur systematischen Erstellung von Referenzarchi- turen nach (Galster und Avgeriou 2011; Nakagawa et al. 2014; Reidt 2019) als Grundlage der Ableitung der Schritte zur Konzeption	82
Abbildung 4-2 Vorgehensweise zur Erstellung der Referenzarchitektur.....	83
Abbildung 4-3 Spezifizierung des Referenzarchitektur-Typs im Schema nach (Reidt 2019, 30 f.)	85
Abbildung 4-4 Auswahl der Informationsquellen sowie Anwendungs- und Entwicklungs- bezug der Arbeiten.....	86
Abbildung 4-5 Stakeholder-Analyse zur Entwicklung der Referenzarchitektur	87
Abbildung 4-6 Grobkonzept des Aufbaus der Referenzarchitektur	91
Abbildung 4-7 Übersicht über ausgewählte UML-Modellelemente	93
Abbildung 4-8 Übersicht über die Referenzarchitektur	94
Abbildung 4-9 Modellierung Asset	95
Abbildung 4-10 Exemplarische Ausgestaltungsmöglichkeiten der Asset-Ebene	97
Abbildung 4-11 Modellierung IT Systems	98
Abbildung 4-12 Exemplarische Ausgestaltungsmöglichkeiten der IT Systems-Ebene	100
Abbildung 4-13 Modellierung Edge Device	101
Abbildung 4-14 Exemplarische Ausgestaltungsmöglichkeiten der Edge Device-Ebene	103
Abbildung 4-15 Modellierung Network Infrastructure and Databases.....	104
Abbildung 4-16 Exemplarische Ausgestaltungsmöglichkeiten der Network Infrastructure and Databases-Ebene	106
Abbildung 4-17 Modellierung Machine Learning.....	107
Abbildung 4-18 Exemplarische Ausgestaltungsmöglichkeiten der Machine Learning-Ebene	109
Abbildung 4-19 Modellierung Data Connection Management	110
Abbildung 4-20 Modellierung ML Project Management.....	112
Abbildung 4-21 Modellierung Explorative Test Environment und Analysis Process	114
Abbildung 4-22 Modellierung Training Environment und Transfer Mechanism	116
Abbildung 4-23 Modellierung Deployment Environment und Scoring Process	118
Abbildung 4-24 Modellierung Deployment Management.....	121
Abbildung 4-25 Modellierung Application.....	124
Abbildung 4-26 Rollenmodell in ML-Umsetzungsprojekten zur Nutzung der Architektur	125
Abbildung 4-27 Use Case-Diagramm Business Understanding	126
Abbildung 4-28 Use Case-Diagramm Data Understanding	127
Abbildung 4-29 Use Case-Diagramm Data Preparation.....	128

Abbildung 4-30 Use Case-Diagramm Modeling	129
Abbildung 4-31 Use Case-Diagramm Evaluation	130
Abbildung 4-32 Use Case-Diagramm Deployment	131
Abbildung 5-1 Übersicht über die Instanz der Referenzarchitektur im Anwendungsbeispiel	133
Abbildung 5-2 Übersicht über das physische Asset in Dortmund	134
Abbildung 5-3 Grundfließschema des Brauprozesses	135
Abbildung 5-4 Schematische Darstellung relevanter Sensoren und Akteure des Assets	135
Abbildung 5-5 Übersicht über die IT Systems-Ebene	136
Abbildung 5-6 Übersicht über das Edge Device „Datenkonnektor“ (links), dessen Daten- quellen (unten rechts) sowie Datenflüsse und Ausgaben (oben rechts)	137
Abbildung 5-7 Übersicht über das Edge Device „Tilt Pi“ (links), dessen Datenquellen (unten rechts) sowie Datenflüsse und Ausgaben (oben rechts)	138
Abbildung 5-8 Übersicht über die Network Infrastructure and Databases-Ebene.....	139
Abbildung 5-9 Data Connection Management im Anwendungsbeispiel	140
Abbildung 5-10 Ausprägung des ML Project Managements im Anwendungsbeispiel	141
Abbildung 5-11 Übersicht über den Aufbau der Analyseprozesse in der explorativen Test- umgebung.....	142
Abbildung 5-12 Grafisch-Explorative Analysen zu Attributen und Label.....	143
Abbildung 5-13 Ausgewählte Lernverfahren und RMSE im Anwendungsbeispiel	144
Abbildung 5-14 Real-vs.-Predicted-Charts im Anwendungsbeispiel.....	144
Abbildung 5-15 Deployment Environment im Anwendungsbeispiel	145
Abbildung 5-16 Regelkreis der Modellanwendung in der Rezeptplanung sowie der Modell- pflege.....	146
Abbildung 5-17 Entwicklung der Zielgröße im zeitlichen Verlauf (Box-Plot- und Trend- darstellung).....	146
Abbildung 5-18 Übersicht über die Rezeptparameter in den einzelnen Iterationsstufen.....	147
Abbildung 5-19 Übersicht über das Anwendungsszenario (Wöstmann et al. 2020b)	148
Abbildung 5-20 Evaluation der inhaltlichen Anforderungen auf Basis der Umsetzungs- beispiele	152
Abbildung 5-21 Evaluation der Ziele der Referenzarchitektur durch Online-Umfrage (n=13)	153
Abbildung 6-1 Chargeninformationen nach (DIN EN 61512-1:2000-01, 26 ff.).....	157
Abbildung 6-2 Anforderungsdefinition aus Interviewstudie (UN=Unternehmen).....	158
Abbildung 6-3 Modellierung Device Management.....	159
Abbildung 6-4 Modellierung Decentral Data Acquisition and Pre-Processing	160
Abbildung 6-5 Modellierung Decentral Data Storage	161
Abbildung 6-6 Modellierung Decentral Scoring.....	162
Abbildung 6-7 Piping and Instrumentation Diagram (P&ID) des Assets	164

Abbildung 6-8 Datenbankschema der influxDB im Anwendungsbeispiel	165
Abbildung 6-9 Datenmodell der MariaDB im Anwendungsbeispiel (Wöstmann et al. 2022a)	166
Abbildung 6-10 Ishikawa-Diagramm zur Identifikation von Einflussfaktoren auf die messbare sowie subjektiv beurteilbare Bierqualität im Anwendungsbeispiel	167
Abbildung 6-11 Übersicht über die Attribute sowie Kennzahlen zur Beurteilung der Datenqualität	168
Abbildung 6-12 Übersicht über die Lernverfahren und Wertebereiche der Hyperparameteroptimierung im Anwendungsbeispiel	169
Abbildung 6-13 Zusammenfassung der Befragung	170