

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg



OTTO VON GUERICKE
UNIVERSITÄT
MAGDEBURG

MB

FAKULTÄT FÜR
MASCHINENBAU

**Sozio-technischer Gestaltungsansatz für die
Industrie 4.0-Befähigung von Produktionssystemen**

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieurin
(Dr.-Ing.)**

von M. Eng. Natalie Samanta Nowacki
geb. am 11.04.1993 in Hannover

genehmigt durch die Fakultät Maschinenbau
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:
Prof. Dr.-Ing. habil. Arndt Lüder
Prof. Dr.-Ing. Christian Diedrich

Promotionskolloquium am 14.07.2023

Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen Aktiengesellschaft.

Zusammenfassung

Ein Beschluss der Europäischen Union besagt, dass ab dem Jahr 2035 keine Personenkraftwagen mit konventionelle Verbrennungsmotoren zugelassen werden dürfen. Derartige politisch induzierte Anforderungen, neue Erkenntnisse technologischer Grundlagen wie auch individuelle Kundenanforderungen stellen Industriebetriebe vor die Herausforderung eines Wandels ihres Produktportfolios. Eine erfolgreiche Umstellung auf neuartige Anforderungen setzt voraus, dass die industriellen Produktionssysteme schnell und stabil anlaufen.

Gepaart mit der stetig zunehmenden Popularität der Datenanalysemethoden steigt in der Industrie der Wunsch nach einer datenbasierten Informationsbereitstellung für die Produktionsmitarbeiter. Der hohe Automatisierungsgrad der deutschen Industrie bildet hierfür theoretisch eine adäquate Basis, um diese Potentiale ausschöpfen zu können. In der Realität zeichnen sich die Produktionsanlagenparks von Industrieunternehmen durch über Jahre bestehende und heterogene Anlagentechnik aus, die den heutigen Anforderungen der Datenbereitstellung nicht gerecht werden. Vereinzelt werden in der Wissenschaft bereits Lösungsansätze für die Gewinnung der Daten aus derartigen Altanlagen unter dem Begriff des „Retrofitting“ beschrieben. Diese Lösungen wurden teilweise unter idealisierten Bedingungen umgesetzt, weshalb sie für Industriemitarbeiter kaum adaptierbar sind. Eine effiziente Lösung steht in einem starken Zusammenhang mit der vorliegenden Anlagentechnik, der Architektur der Informationstechnologie, den herrschenden Unternehmensregularien und dem angestrebten Ziel. Entwickelte Standardisierungen im Rahmen der Industrie 4.0 stellen eine weitere Herausforderung bei der Umsetzung derartiger Vorhaben aufgrund des fehlenden Gesamtzusammenhanges dar.

Es stellt sich daher die Frage, ob eine generischer Handlungsleitfaden auf Basis der bisherigen wissenschaftlichen Erkenntnisse und Standardisierungen abgeleitet werden kann, um den Industriemitarbeitern eine Hilfestellung bei Retrofittings zu bieten. Diese Dissertation setzt sich mit Produktionssystemen aus sozio-technischer Systemsicht auseinander und arbeitet den Begriff der Industrie 4.0 grundlegend auf. Das Resultat dieser Arbeit erweitert eine bestehende Referenzarchitektur um den Aspekt der Datenbereitstellung. Auf Basis dieser Referenzarchitektur wird weiterführend ein Handlungsleitfaden für die Anbindung der Anlagentechnik unter Berücksichtigung bestehender Informationstechnologie und Unternehmensregularien für die Umsetzung eines Retrofittings aufgezeigt. Eine abschließende, prototypische Anwendung verdeutlicht die methodische Anwendung.

Abstract

A decision by the European Union states that no passenger cars with conventional combustion engines may be registered after 2035. Such politically induced requirements, new findings in technological fundamentals as well as individual customer requirements present industrial companies with the challenge of changing their product portfolio. Successful conversion to new requirements requires industrial production systems to start up quickly and stably.

Along with the steadily increasing popularity of data analysis methods, there is a growing desire in industry for data-based information provision for production employees. The high level of automation in German industry theoretically provides an adequate basis for exploiting this potential. In reality, the production plant parks of industrial companies are characterized by heterogeneous plant technology that has existed for years and does not meet today's data provision requirements. In the scientific community, some solutions for the extraction of data from such legacy machines have already been described under the term "retrofitting". These solutions were partly implemented under idealized conditions, which is why they are hardly adaptable for industrial employees. An efficient solution is strongly related to the existing automation technology, the architecture of the information technology, the prevailing company regulations and the intended goal. Developed standardizations in the context of Industrie 4.0 represent a further challenge in the implementation of such projects due to the lack of overall coherence.

The question therefore arises as to whether a generic action guideline can be derived on the basis of the scientific findings and standardizations to date in order to offer industry employees assistance with retrofitting. This dissertation deals with production systems from a socio-technical system approach and fundamentally elaborates the concept of Industrie 4.0. The result of this work extends an existing reference architecture by the aspect of data provision. On the basis of this reference architecture, a guideline for the connection of automation technology is presented, taking into account existing information technology and company regulations for the implementation of retrofitting. A final prototypical application illustrates the methodical application.

Ehrenerklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die Hilfe eines kommerziellen Promotionsberaters habe ich nicht in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen. Verwendete fremde und eigene Quellen sind als solche kenntlich gemacht.

Ich habe insbesondere nicht wissentlich:

- Ergebnisse erfunden oder widersprüchliche Ergebnisse verschwiegen,
- statistische Verfahren absichtlich missbraucht, um Daten in ungerechtfertigter Weise zu interpretieren,
- fremde Ergebnisse oder Veröffentlichungen plagiiert,
- fremde Forschungsergebnisse verzerrt wiedergegeben

Mir ist bekannt, dass Verstöße gegen das Urheberrecht Unterlassungs- und Schadensersatzansprüche des Urhebers sowie eine strafrechtliche Ahndung durch die Strafverfolgungsbehörden begründen kann.

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass die Dissertation ggf. mit Mitteln der elektronischen Datenverarbeitung auf Plagiate überprüft werden kann.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form als Dissertation eingereicht und ist als Ganzes auch noch nicht veröffentlicht.

Braunschweig, 09.09.2023

Natalie Samanta Nowacki

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	I
Abstract.....	III
Ehrenerklärung	V
Abkürzungsverzeichnis	IX
Symbolverzeichnis	XIII
Abbildungsverzeichnis	XV
Tabellenverzeichnis	XVII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Problemstellung	2
1.3 Ziele und Nicht-Ziele der Arbeit.....	4
1.4 Forschungsgebiet	5
1.4.1 Abgrenzung und Forschungsziele	7
1.4.2 Wissenschaftliche Methode und Aufbau der Arbeit	11
2 Theoretischer Bezugsrahmen	13
2.1 Interdisziplinäre Zusammenarbeit im Industriebetrieb.....	13
2.1.1 Historische Eckdaten der Industrie.....	13
2.1.2 Herausforderungen und Hindernisse der interdisziplinären Zusammenarbeit in Industriebetrieben	15
2.2 Industrie 4.0 zur Beherrschung der Produktionssystemkomplexität	17
2.2.1 Initiatoren und Geschichte.....	18
2.2.2 Die industriellen Revolutionen und Einordnung des heutigen Industrie 4.0-Begriffes.....	20
2.2.3 Begriffsdefinition der Industrie 4.0 für den Rahmen dieser Arbeit.....	27
2.2.4 Internationale Akteure und ihre Initiativen analog der Industrie 4.0	32
2.3 Beherrschung der Produktionsprozesskomplexität mithilfe des Informationsmanagement.....	35
2.3.1 Wissenstreppe.....	36
2.3.2 Determinanten der Problemlösungsfähigkeit	37
2.3.3 Wissensweitergabe in Unternehmen	40
2.3.4 Verwaltungsschale als Informationsträger der Industrie 4.0- Komponente	42
2.4 Sozio-technische Produktionssysteme in Industriebetriebe	44
2.4.1 Die Phasen des Produktlebenszyklus	44
2.4.2 Bezug der Systemtheorie auf Produktionssysteme.....	46
2.4.3 Technische Elemente von Produktionssystemen.....	49
2.4.4 Der Mensch als soziales Systemelement von Produktionssystemen.....	51
3 Konkretisierung der Forschungsfrage	55
4 Ableitung einer erweiterten Referenzarchitektur aus bekannten Modellen	57
4.1 Einordnung im RAMI 4.0	57

4.2	Referenzarchitektur zur Herstellung der Konnektivität.....	59
5	Methodik zur Gewinnung repräsentativer Prozessinformationen zu Produktionssystemen.....	67
5.1	Anforderungsanalyse	69
5.1.1	Beschreibung des Anforderungskontext mithilfe der Systemmodellierung.....	69
5.1.2	Ermittlung von Informationsbedarfen auf Basis prozessualer Wissenslücken.....	71
5.2	Stakeholderanalyse	74
5.3	Ermittlung der relevanten Informationsobjekte.....	76
5.4	Aufzeigen der hardwareseitigen Durchgängigkeit	78
5.5	Lokalisierung der Merkmalquelle.....	80
5.6	Ermittlung der Adapterstrategie	82
5.7	Durchführung einer Wirtschaftlichkeitsanalyse	83
5.8	Definition einer Datenstruktur	85
5.9	Umsetzung der Adapterstrategie.....	87
5.10	Bereitstellung der Informationen für die Applikation	87
5.11	Erstellung einer Applikation.....	88
6	Prototypische Anwendung zur Methodvalidierung anhand eines praktischen Beispiels	91
6.1	Anforderungsanalyse	91
6.2	Stakeholderanalyse	95
6.3	Ermittlung der relevanten Informationsobjekte.....	96
6.4	Aufzeigen der hardwareseitigen Durchgängigkeit	97
6.5	Lokalisierung der Merkmalquelle.....	98
6.6	Ermittlung der Adapterstrategie	100
6.7	Durchführung einer Wirtschaftlichkeitsanalyse	102
6.8	Definition einer Datenstruktur	103
6.9	Umsetzung der Adapterstrategie.....	104
6.10	Bereitstellung der Informationen für die Applikation	104
6.11	Erstellung einer Applikation.....	105
6.12	Validierung des Gesamtprojektziels durch die anfordernde Domäne	107
7	Zusammenfassung und kritische Betrachtung	109
7.1	Aktuelle Herausforderungen bei der Umsetzung von Industrie 4.0	109
7.2	Methodenkritik und Lessons Learned aus der prototypischen Anwendung.	110
7.3	Wissenschaftlicher Beitrag	113
8	Ausblick	115
	Literaturverzeichnis.....	117

Abkürzungsverzeichnis

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
Abb.	Abbildung
APC	Advanced Process Control
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klima
BSI	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik
bzgl.	bezüglich
CIM	computer-integrated manufacturing
CORE	Controlled requirements expression
COVID-19	Corona Virus Disease 2019
CPS	cyber-physische Systeme
CPU	Central Processing Unit
CRISP-DM	Cross Industry Standard Process for Data Mining
DC	direct communication
DF	Digital Factory
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMC	Data Matrix Code
DMZ	Demilitarisierte Zone
DP	Datenpunkt
e. V.	eingetragener Verein
E/A	Eingangs-/Ausgangs(baugruppe)
EHM	Equipment Health Monitoring
FC	Fault Classification
FD	Fault Detection
FDC	Fault Detection and Classification
FP	Fault Prediction (or prognosis)
engl.	englisch
etc.	et cetera
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
ggf.	gegebenenfalls
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung

GW	Gateway
HDI	Human Development Index
HMI	Human Machine Interface
i.O.	in Ordnung
ID	Identifikator
IIC	Industrial Internet Consortium
IEC	International Electrotechnical Commission
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
ISO	Internationale Organisation für Normung
IT	Informationstechnologie
JAD	Joint Application Design
JPEG	Joint Photographic Experts Group
KMU	Kleinstunternehmen, kleine und mittlere Unternehmen
lt.	lateinisch
MBSE	Model-Based Systems Engineering
Mio.	Million
MQTT	Message Queuing Telemetry
Mrd.	Milliarde
mRNA	messenger ribonucleic acid
n.i.O.	nicht in Ordnung
NNMI	National Network for Manufacturing Innovation
Nr.	Nummer
o. g.	oben genannten
OCF	Open Connectivity Foundation
OEE	Overall Equipment Effectiveness
OID	Object Identifier
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture
OT	operative Technologie
OTU	OT-Upgrade
PdM	Predictive Maintenance
Pub	Publish
PPR	Produkt-Prozess-Ressource

Q	Quartal
QFD	Quality Function Deployment
R2R	Run-to-Run Control
RAMI 4.0	Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0
REST	Representational State Transfer
REQ	Requirement
RFID	Radio-Frequency Identification
s.	siehe
s. a.	siehe auch
SECI	Socialization, Externalization, Combination, Internalization
SMLC	Smart Manufacturing Leadership Coalition
SNMP	Simple Network Management Protocol
Sub	Subscribe
SPC	Statistical Process Control
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SysML	Systems Modeling Language
Tab.	Tabelle
u. a.	und andere
UID	Unique Identifier
UNDP	United Nations Development Programme
USA	United States of America
VDA	Verband der Automobilindustrie e. V.
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.
vgl.	vergleiche
VM	Virtual Metrology
VWS	Verwaltungsschale
WSM	Weighted Sum Model
z. B.	zum Beispiel
ZVEI	Verband der Elektro- und Digitalindustrie e. V.

Symbolverzeichnis

$Z(t_x)$	zeitvariabler Systemzustand
$Z_{konstant}$	konstanter Systemzustand
$2 \dots n$	Anzahl der Systemelemente

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1: Modell interdisziplinärer Kompetenzen mit Verhaltensbeispielen.....	16
Abb. 2-2: Jährliche Anzahl der Veröffentlichungen zu den Begriffen „Industrie 4.0“ und „Industry 4.0“ und prognostiziertes Investment in das Themenfeld.....	19
Abb. 2-3: Entwicklung des nominellen BIP und Reallöhne in Deutschland seit 1850 ...	22
Abb. 2-4: Getreideproduktion und Erwerbstätige nach Wirtschaftssektoren seit 1880 ..	24
Abb. 2-5: Profil der Schülerinnen und Schüler nach Schularten [%].....	25
Abb. 2-6: Das Stufenmodell des Industrie 4.0 Entwicklungspfades	29
Abb. 2-7: Übersicht über europäische Initiativen zur Digitalisierung der Industrie und Initiativen analog der Industrie 4.0	35
Abb. 2-8: Ergänzung der Wissenstreppe um die Reifegradstufen der Industrie 4.0	36
Abb. 2-9: Determinanten der individuellen Problemlösungsfähigkeit.....	38
Abb. 2-10: Die menschliche Lernkurve	39
Abb. 2-11: Wissensspirale	42
Abb. 2-12: Schematische Darstellung der Industrie 4.0-Komponente und der zugehörigen Verwaltungsschale	43
Abb. 2-13: Produktlebenszyklus	45
Abb. 2-14: Systemarten und Problemebenen	47
Abb. 2-15: Verhalten von Produktionssystemen bei Kurzzeit- und Langzeitbetrachtung.....	48
Abb. 2-16: Der Mensch als beeinflussendes Element innerhalb von Produktionssystemen	48
Abb. 2-17: Technische Elemente von Produktionssystemen	50
Abb. 2-18: Aktivitätsdiagramm der Qualitätssteuerung in Verbindung der individuellen Problemlösungsfähigkeit.....	52
Abb. 2-19: Strukturales Konzept der sozialen Elementen von Produktionssystemen	53
Abb. 4-1: Verortung des fachlichen Beitrages im RAMI 4.0.....	58
Abb. 4-2: Grundstruktur der erweiterten Referenzarchitektur	60
Abb. 4-3: Legende für die erweiterte Referenzarchitektur.....	61
Abb. 4-4: Klassisches, automatisiertes Produktionssystem.....	62
Abb. 4-5: Cyber-physisches Produktionssystem.....	62
Abb. 4-6: Cyber-physisches Produktionssystem mit Datennutzung	64
Abb. 4-7: Autonom-agierendes Produktionssystem.....	65
Abb. 5-1: Schritte des Retrofit-Leitfadens entlang der erweiterten Referenzarchitektur	67
Abb. 5-2: Rollenaufteilung und Empfehlungen der Rollenpaarung.....	75
Abb. 5-3: Wirkungsbereiche der identifizierten Rollen entlang der Industrie 4.0- Reifegradstufen	76
Abb. 5-4: Entscheidungsbaum für die Klassifikation in Informationsclustern	77
Abb. 5-5: Modellierungsprozess der Verwaltungsschalen-Teilmodelle	78
Abb. 5-6: Beispielhafte OT-IT-Architektur mit Netzwerksegmentierung	79
Abb. 5-7: Lokalisierung von Datenquellen in der OT-IT-Netzwerkarchitektur	81
Abb. 5-8: Möglicher pyramidaler Aufbau eines Informationsmodells	86
Abb. 5-9: CRISP-DM	89
Abb. 6-1: Produktionsprozess eines Hairpinstators.....	92
Abb. 6-2: Legende der PPR-Modellierung.....	93
Abb. 6-3: PPR-Modell des Stator-Produktionssystems.....	94
Abb. 6-4: Bestehende Netzwerkarchitektur des Anwendungsfalls	98

Abb. 6-5: Lokalisierung der exakten Merkmalquellen des Anwendungsbeispiels.....	99
Abb. 6-6: Adapterstrategien des Anwendungsfalls.....	101
Abb. 6-7: Eingestellte Prüf-Toleranzwerte und Ist-Werte der Prüfmerkmale je Hairpinanlage.....	105
Abb. 6-8: Gegenüberstellung der Toleranzwerteeinstellungen und Fehlerhäufigkeiten	106
Abb. 6-9: Heatmap zur Eingrenzung der fehlerverursachenden Hairpinanlage	107
Abb. C-1: Modellierung des Informationsbedarfes bzgl. des Stator- Produktionssystems	137

Tabellenverzeichnis

Tab. 1-1: Literaturreview zu Veröffentlichungen mit sozio-technischem Gestaltungsansatz im Kontext der Industrie 4.0	10
Tab. 2-1: Identifikationsfaktoren der ersten drei industriellen Revolutionen	27
Tab. 2-2: Ausgewählte internationale Initiativen äquivalent der Industrie 4.0	32
Tab. 2-3: Individuelle und kollektive, organisatorisches Wissensarten	41
Tab. 2-4: Fehlerarten der Elemente mechatronischer Systeme	50
Tab. 5-1: Benchmarkkriterien zur Auswahl einer geeigneten Systemmodellierungsmethodik	70
Tab. 5-2: Bewertungskriterien für die Einschätzung des tangiblen Nutzens von Retrofit-Lösungen	84
Tab. 6-1: Rollenverteilung und -paarung im Anwendungsfall.....	96
Tab. 6-2: Identifizierte Datenpunkte zur Erfüllung der Informationsbedarfe	96

1 Einleitung

Die Markteinführung neuartiger Produkte stellt Betriebe jeglicher Branchen vor große produktionstechnische Herausforderungen. Das derzeit prominenteste Beispiel stellt die Herstellung von Impfstoffen zur Bekämpfung von COVID-19 dar. Die globale Pandemie hat den Druck zur Entwicklung eines wirksamen Impfstoffes auf Forschungseinrichtungen und Produzenten weltweit erhöht. Im Jahr 2020 wurde erstmalig ein mRNA-Impfstoff durch eine staatliche Regulierungsbehörde zugelassen (vgl. Hofmann, 2020). Gegenüber den klassischen Lebend- und Totimpfstoffen¹ hat dieser, in Anbetracht der weltweiten Notlage, den entscheidenden Vorteil in vergleichsweise kurzer Zeit in großen Mengen synthetisch hergestellt werden zu können (vgl. BioNTech Europe GmbH, 2021).

Gemäß FRIMMER wurden anfänglich anvisierte Produktionsziele im Laufe der Medienberichterstattung auf die Hälfte reduziert. Der neuartige Produktionsprozess stellte die erfahrene Branche vor die Herausforderung, die hohen Qualitätsanforderung an das Produkt verlässlich zu erfüllen. Die Produzenten konnten aufgrund der Produktinnovation bislang nur wenig Erfahrung in der industriellen Produktion des Wirkstoffes sammeln (vgl. Frimmer, 2020). Dieses Phänomen trifft nicht nur die Pharmaindustrie, sondern spiegelt die Erfahrung des gesamten produzierenden Gewerbes bei Einführung neuartiger Produkte wider.

1.1 Motivation

Neue Erkenntnisse technologischer Grundlagen ermöglichen die Optimierung des Produktportfolios von Betrieben. Politische Regularien sowie Umweltereignisse sind ebenfalls Faktoren, die den Weg zu Produktinnovationen in einer immer höheren Frequenz bereiten. Der verkürzte Produktlebenszyklus (vgl. VDI 2206:2004-06, S. 3) führt dazu, dass der Produktionsprozess immer schneller anlaufen und stabilisiert werden muss. Die Güte² eines Produktionsprozesses lässt sich anhand der Überwachung von Qualitätsanforderungen eines Produktes erfassen (vgl. DIN EN IEC 9000:2015-11, S. 39f). Eine zunehmende Abweichung der festgelegten Qualitätsziele wird umgangssprachlich in der Domäne als „Abdriften“ bezeichnet. Das Auftreten eines solchen Falles erfordert die Prozesskorrektur durch Mitarbeiter (vgl. ISO 9001:2015-09, S. 6). Unter Zuhilfenahme von Messmitteln werden die Merkmale eines Produktes geprüft und die Ursachen des Abdriftens auf Basis von Erfahrungswerten manuell ermittelt und korrigiert. Ein langfristig funktionierendes

¹ (s. a. BMSGPK, 2021)

² Fähigkeit zur erfolgreichen Erreichung eines festgelegten Qualitätsziel (vgl. DIN EN IEC 9000:2015-11, S. 43)

Produktionssystem besteht daher aus technischen Elementen der Maschine sowie sozialen Elementen, den Menschen, die den Betrieb sicherstellen. In der Gesamtheit kann ein Produktionssystem demnach als ein sozio-technisches System angesehen werden (s. a. Hildebrand, Mäding, Günther, & Müller, 2005, S. 4).

Die Fähigkeit zur Prozesskorrektur, und damit auch die Rentabilität eines Produktionssystems, steigt zunehmend mit dem Wissen der Mitarbeiter. Das Wachstum des individuellen Wissens ist sowohl von prozessualen³ als auch sozialen⁴ Faktoren abhängig. Das Erlernen rein technischer Sachverhalte steht im Zusammenhang mit der Prozesskomplexität, also den direkten sowie indirekten Kausalbeziehungen innerhalb des betrachteten Systems (vgl. VDI 2206:2004-06, S. 4). Je höher die Komplexität, desto schwerer fällt die manuelle Ermittlung von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen, die durch die individuelle Leistungsfähigkeit des menschlichen Gedächtnisses begrenzt ist.

Zur Unterstützung des Menschen gewinnen neue Hilfsmittel unter dem Namen „künstliche Intelligenz“ zunehmend an Popularität. Betriebe, deren Basis ein digitales Produktportfolio bildet, wie Google, Meta, etc., sind dafür bekannt, Daten in einem großen Umfang zu sammeln und zu analysieren. Aber auch für Industriebetriebe gewinnt die Nutzung des Datenpotentials einen immer höheren Stellenwert (vgl. Bitkom, 2022). Aufgrund des steigenden Automatisierungsgrades (vgl. International Federation of Robotics, 2021) stünden Industriebetrieben potentiell viele Datenpunkte als Ergänzung der manuellen Informationsgewinnung zur Verfügung. Um dieses Potential ausschöpfen zu können, steht die Industrie vor der Herausforderung, ihre Maschinen für die Datenbereitstellung zu befähigen.

1.2 Problemstellung

Die Auswertung und Interpretation von Daten zur Informationsgewinnung setzt die Verfügbarkeit von Daten voraus. Diese Daten müssen jedoch nicht nur verfügbar sein, sondern auch diverse Randbedingungen erfüllen, um nutzbare Informationen aus ihnen gewinnen zu können.

³ Z.B. Vorwissen (potentielles Wissen aufgrund des bspw. Analogieschluss), welches jeder Mensch besitzt (vgl. Dörner, 1984, S. 12).

⁴ Weitergabe von Wissen durch soziale Interaktion im Betrieb (vgl. Nonaka & Takeuchi, 1997, S. 87).

Im Kontext der Erweiterung des Verständnisses über die Systemkomplexität eines Produktionsprozesses, werden in der Industrie Laufzeitdaten aus Produktionsanlagen⁵ benötigt. Laufzeitdaten entspringen den operativen Technologien (OT) von Produktionssystemen, während die Informationsgewinnung mithilfe von bspw. statistischen Datenanalysen innerhalb der Informationstechnologien (IT) erfolgt.

Die Verbindung der OT mit der IT zur Bereitstellung von Laufzeitdaten wird als Konnektivität bezeichnet (vgl. Schuh, Anderl, Dumitrescu, Krüger, & ten Hompel, 2020a, S. 18f). Mit zunehmender Popularität der datenbasierten Informationsbereitstellung gewinnt ebenfalls die Disziplin der Konnektivität als abschließender Schritt der Digitalisierung zunehmend an Bedeutung (s. 2.2.1). Da in der Vergangenheit solch eine Anforderung einer IT-Schnittstelle nicht bestand, ist die Automatisierungstechnik der vergangenen Jahre unter zusätzlichem Aufwand diesbezüglich nachträglich zu befähigen. Diese Lücke wurde von zahlreichen Betrieben erkannt, welche nun Lösungen für das sogenannte Retrofitting von bestehenden Produktionssystemen (Brownfield)⁶ stetig entwickeln und anbieten. Das entstandene Überangebot erschwert es, die optimale Lösung für den spezifischen Prozess und den herrschenden Randbedingungen auszuwählen.

Als Vorreiter in Europa belegt Deutschland im internationalen Vergleich den vierten Platz bzgl. der Roboterdichte in der Industrie, der wichtigsten Kennzahl zur Ermittlung des Automatisierungsgrades einer Nation (vgl. International Federation of Robotics, 2022). Produktionssysteme in der deutschen Industrie sind daher weitestgehend computerisiert, weshalb Daten grundsätzlich vorliegen. Ein Nachteil dieser Vorreiterschaft ist jedoch eine über Jahrzehnte gewachsene heterogene Automatisierungslandschaft. Diese Heterogenität führt dazu, dass entsprechend der technischen Rahmenbedingungen aus IT und OT diverse Konnektivitätslösungen entwickelt werden müssen, um ein Retrofitting der Industrie umzusetzen.

Die Heterogenität der Automatisierungslandschaft ist nicht nur ein Phänomen, welches zwischen verschiedenen Industriebetrieben auftritt. Vielmehr sind es die innerbetrieblichen Disparitäten, die ein hohes Maß an monetärem wie auch personellem Aufwand erfordern, bevor dieser sich durch die angestrebte Datennutzung amortisiert. In einer, von der DEUTSCHEN AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN (ACATECH) veröffentlichten, Studie wurden sowohl strategische als auch operative Hemmnisse bei der Umsetzung von Industrie

⁵ Im Kern beinhaltet dies Produktdaten und Produktions- bzw. Prozessdaten (vgl. Röhl, Bolwin, & Hüttl, 2021, S. 25)

⁶ In der Neuplanungen heutiger Produktionssysteme (Greenfield) wird Automatisierungstechnik verwendet, die über diese Möglichkeit der Datenbereitstellung bereits verfügt.

4.0-Projekten⁷ identifiziert. Aus Unternehmensperspektive stellt aus strategischer Sicht ein fehlender Startimpuls für die Digitalisierung ein zentrales Hemmnis dar. Operativ scheitern digitale Projekte in vielen Fällen aufgrund von mangelnden Strategiefähigkeiten, welche sich u.a. auf einen unklaren wirtschaftlichen Nutzen und fehlendes Wissen über Digitalisierungsmöglichkeiten zurückzuführen lassen. Neben diesen intern induzierten Problemen werden auch unzureichende externe Rahmenbedingungen, wie bspw. fehlende Standards und Normen benannt (vgl. Hirsch-Kreinsen, et al., 2022, S. 41-73).

Aus wissenschaftlicher Perspektive beschäftigen sich diverse Arbeiten mit verschiedenen Disziplinen zum Themengebiet der „Industrie 4.0“. Das Spektrum der Arbeiten reicht von der Entwicklung von Industrie 4.0-Kommunikationsstandards bis hin zu Machine Learning-Algorithmen. Diese detaillierten Abhandlungen in den Teilgebieten bieten den Fachexperten der Wissenschaft einen immer tieferen Erkenntnisgewinn in den jeweiligen Disziplinen. Demgegenüber stehen Mitarbeiter in Industriebetrieben vor der Herausforderung eines fehlenden, allgemeinen Überblicks der notwendigen Kernelemente und verfügbaren Lösungsansätze bei der Umsetzung von Industrie 4.0-Projekten.

Letztendlich profitieren sowohl Wirtschaft wie auch Wissenschaft im Kontext der Industrie 4.0 nur, wenn die Forschung auch einen praktikablen Nutzen für Industriebetriebe bietet. Einen großen Anteil hat dabei die Herstellung der Konnektivität für die datenbasierte Informationsbereitstellung zur Unterstützung der Mitarbeiter für die Beherrschung der Systemkomplexität.

1.3 Ziele und Nicht-Ziele der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist die Präsentation einer strategischen Vorgehensweise zur Erreichung der Industrie 4.0 im Produktionsumfeld der industriellen Praxis. Dabei wird der Umfang der Forschung zur Industrie 4.0 auf die, zur Umsetzung notwendigen, Kernelemente reduziert und das Spektrum der Handlungsmöglichkeiten aufgezeigt. Die Zielgruppe dieser Arbeit bilden primär Mitarbeiter von Industriebetrieben, welche nicht in jedem Fall einen wissenschaftlichen Ausbildungshintergrund aufweisen. Die Anwendung der präsentierten Vorgehensweise soll ein Resultat hervorbringen, welches Mitarbeitern der Produktion zum Zweck der Beherrschung der Produktionssystemkomplexität dient. Die Prämisse bildet

⁷ Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff „Industrie 4.0“ als Ausschöpfung der, durch die Digitalisierung vorliegenden, Datenpotentiale angesehen. Die Herleitung dieser Sichtweise kann in Kapitel 2.2 nachvollzogen werden.

daher immer ein konkreter, praktischer Anwendungsfall, für dessen Lösung diese Arbeit als Hilfsmittel hinzugezogen wird.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Herstellung der bedarfsorientierten Konnektivität, wozu ebenfalls die Domänen der OT und IT einbezogen werden. In diesen Domänen haben sich bereits Methoden etabliert, die aufgegriffen und referenziert werden. Somit geht hervor, dass mindestens die drei Domänen der Produktion, OT sowie IT in die Vorgehensweise involviert sein müssen. Eine Grundvoraussetzung dieser Arbeit ist daher, eine interdisziplinäre Zusammenarbeit dieser Domänen zu ermöglichen. Im Vordergrund steht die Ermöglichung der Kapselung der jeweiligen Expertisen und die Ermöglichung einer losen Kopplung dieser Domänen an den erforderlichen Punkten. Genutzt werden sollen die o. g. bereits auf dem Markt bereitstehenden, technischen Retrofitting-Lösungen nach einer entsprechenden gezielten Bewertung für den Anwendungsfall.

Das explizite Nicht-Ziel dieser Arbeit betrifft eine pauschale Datengewinnung ohne konkrete Vorabüberlegung eines konkreten Zwecks. Es werden ebenfalls keine spezifischen Lösungen betreffend der einzelnen Industrie-4.0-Disziplinen entwickelt, sondern auf die bestehenden Lösungen aus Wissenschaft und Technik verwiesen.

Das Hauptziel bildet die Entwicklung einer Vorgehensmethodik zur Realisierung der Grundanforderung der Digitalisierung von Produktionssystemen des Brownfields zur Ermöglichung der Industrie 4.0. Teilziele sind hierbei:

- Die Modellierung von Produktionssystemen als sozio-technische Systeme.
- Die Entwicklung einer Vorgehensmethodik zur domänenübergreifenden Zusammenarbeit.
- Die Abbildbarkeit der Systemkomplexität und daraus folgend die Unterstützung der Produktionsmitarbeiter bei der Bewältigung der Prozesskorrektur.

1.4 Forschungsgebiet

Aufgrund der Computerisierung der Industrie („dritte industrielle Revolution“, s. 2.2.2) wird von technischen Systemen ein deterministisches Verhalten erwartet (vgl. Ropohl, 2009, S. 200). Tatsächlich unterliegen automatisierte Produktionssysteme auch stochastischen Einflussgrößen, sodass im Allgemeinen nicht pauschal von einem deterministischen Systemverhalten ausgegangen werden kann (s. 2.4.2). Entwicklungsingenieure berücksichtigen diese Varianz des Systemzustandes, indem sie zulässige

Fertigungstoleranzen für das Produkt definieren. So kann die technische Funktionalität des gefertigten Produktes gewährleistet werden, auch wenn parallel das mechatronische System eine Varianz aufweist. Es liegt in der Hand des Menschen, diese Systemvarianz im Rahmen der Prozesskorrektur zu beherrschen und durch manuellen Eingriff in dem zulässigen Toleranzbereich zu halten. Aus ingenieurwissenschaftlicher Betrachtungsweise weist der Mensch ein stochastisches Systemverhalten auf⁸ (vgl. Hildebrand, Mäding, Günther, & Müller, 2005, S. 4). Als übergreifender Forschungsansatz setzt die allgemeine Systemtheorie das Ziel einer ganzheitlichen Betrachtung von Systemen voraus (vgl. VDI/VDE 2206:2021-11, S. 9). Gemäß dieses Ansatzes ist ein Produktionssystem aufgrund des notwendigen, regulierenden Eingriffes des Menschen als sozio-technisches Gesamtsystem zu betrachten (s. a. Hildebrand, Mäding, Günther, & Müller, 2005, S. 4f).

Ein aktueller Trend der heutigen Zeit ist die datenbasierte Unterstützung des Menschen zur Beherrschung der Systemvarianz komplexer Produktionsprozesse (vgl. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V., 2013, S. 48). Der Industriestandort Deutschland benennt diesen Trend mit dem Begriff „Industrie 4.0“⁹. Um die datenbasierte Unterstützung des Menschen zu ermöglichen, bedarf es im Sinne des Begriffes „Mechatronik“ einer interdisziplinären Zusammenarbeit verschiedener Domänen (vgl. VDI/VDE 2206:2021-11, S. 27f). Es gilt das Gesamtsystem methodisch strukturiert zu analysieren, zu spezifizieren und entsprechend der Anforderungen Lösungen zu entwickeln und das System zu modifizieren, welches den Forschungsgegenstand des Systems Engineering darstellt (vgl. Haberfellner, Nagel, Becker, Büchel, & von Massow, 1999, S. 4). Deshalb ist diese Arbeit dem Forschungsgebiet des Systems Engineering zuzuordnen.

Der gesamtheitliche Blick auf den Fertigungsprozess als sozio-technisches Gesamtsystem setzt auch die Berücksichtigung des sozialen Systemelementes „Mensch“ voraus. Die Güte des menschlichen Einflusses auf den Produktionsprozess ist abhängig von den kognitiven Fähigkeiten eines Individuums. Zu diesen kognitiven Fähigkeiten zählen diejenigen Determinanten des menschlichen Gedächtnisses, die grundsätzlich zur Problemlösung benötigt werden wie z.B. Intelligenz, Motivation, Emotion und Selbstkonzepten im gleichen Maße (s. 2.3.2). Aufgrund des nicht unerheblichen Zusammenhanges zwischen den

⁸ Gemäß GERRIG existiert aus Sicht der Psychologie ebenfalls der „psychologische Determinismus“, dessen berühmtestes Vertreter Sigmund Freud war. Der Kerngedanke des psychologischen Determinismus besagt, dass jeder Mensch durch seine zuvor gemachten Erfahrungen geprägt wird. Ist man sich diesen individuellen Erfahrungen bewusst, lassen sich die Handlungen des betrachteten Menschen determinieren (vgl. Gerrig, 2018, S. 519). Die komplexen Zusammenhänge der menschlichen Psychologie sind jedoch nicht für jeden Mitarbeiter als Individuum ergründbar und werden im Rahmen dieser Arbeit daher im ingenieurwissenschaftlichen Sinne als nicht deterministisch angesehen.

⁹ Im internationalen Kontext werden durchaus auch andere Begriffe verwendet (s. 2.2.4)

kognitiven Fähigkeiten und der Beherrschung eines Produktionsprozesses beschäftigt sich diese Arbeit ebenfalls in Teilen mit den Forschungsergebnissen des Informationsmanagement und der Gedächtnisforschung.

1.4.1 Abgrenzung und Forschungsziele

Die Vielzahl an wissenschaftlichen Handlungsfelder und Erkenntnisse können, insbesondere aus den fremden Fachdomänen, für Nicht-Wissenschaftler sehr herausfordernd sein. Das betrifft nicht nur die Divergenz zwischen der Wissenschaft und Wirtschaft selbst. Die VDI/VDE 2206:2021-11 benennt auch die sprachliche Differenz der einzelnen Domänen der Mechatronik als eine wesentliche Herausforderung in der interdisziplinären Zusammenarbeit (vgl. VDI/VDE 2206:2021-11, S. 9). Diese Arbeit ist eine praxisorientierte Forschungsarbeit. Das bedeutet, dass konkret einzelne Fachdomänen aus den ingenieurwissenschaftlichen Bereichen der Wirtschaft dazu befähigt werden sollen, interdisziplinär ein Industrie 4.0-Projekt mit einem definierten Ziel zu erarbeiten. Diese Arbeit soll einen Überblick über die wichtigen zu berücksichtigenden Aspekte geben und Vorgehensvorschläge zu den einzelnen Teilaspekten aufzeigen.

Mit dem Zweck Deutschland im internationalen Vergleich als einen konkurrenzfähigen Standort der Produktionstechnik zu erhalten, hat der ARBEITSKREIS INDUSTRIE 4.0 konkrete Charakteristika von Industrie 4.0 definiert. Das umfasst die horizontale Integration über Wertschöpfungsnetzwerke, die digitale Durchgängigkeit des Engineerings über die gesamte Wertschöpfungskette, die vertikale Integration und vernetzte Produktionssysteme. Laut der Autoren sollen diese Charakteristika die Berücksichtigung individueller Kundenwünsche bis hin zur rentablen Einzelstückfertigung ermöglichen, Geschäfts- und Engineeringprozesse dynamisch gestalten, neue Formen von Wertschöpfung und neuartige Geschäftsmodelle ermöglichen, Ressourcenproduktivität und -effizienz steigern, die Arbeit Demografie-sensibel gestalten als auch die Work-Life-Balance von Beschäftigten erhöhen (vgl. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V., 2013, S. 19f). Aus diesen Charakteristika wurden durch den ARBEITSKREIS INDUSTRIE 4.0 zudem konkrete Handlungsbedarfe sowie Forschungsempfehlungen konsolidiert und die folgenden acht Handlungsfelder abgeleitet:

1. Standardisierung und Referenzarchitektur
2. Beherrschung komplexer Systeme
3. Flächendeckende Breitbandinfrastruktur für die Industrie

4. Sicherheit
5. Arbeitsorganisation und -gestaltung
6. Aus- und Weiterbildung
7. Rechtliche Rahmenbedingungen
8. Ressourceneffizienz

(vgl. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V., 2013, S. 89-104)

Zurückzuführen auf die in steigender Frequenz eintretenden Disruptionen der Industrie (s. 1.1), gewinnt die datenbasierte Informationsbereitstellung über Produktionssysteme in der industriellen Praxis zunehmend an Bedeutung. Dieser steigende Bedarf und die Sichtbarkeit erfolgreicher Projektumsetzungen sowie vielversprechende Lösungskonzepte in der Forschung fördern die initiale Motivation zur Durchführung von Industrie 4.0-Projekten (vgl. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V., 2013, S. 45f). Übertragen auf die o.g. Handlungsfelder besteht der praktische Bedarf in der *Beherrschung komplexer Systeme*. Laut ARBEITSKREIS INDUSTRIE 4.0 werden „*Produkte und Produktionssysteme [...] immer komplexer. Adäquate Planungs- und Erklärungsmodelle sind eine Basis, um die zunehmende Komplexität zu beherrschen. Ingenieuren müssen Methoden und Werkzeuge an die Hand gegeben werden, um solche Modelle zu erstellen*“ (acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V., 2013, S. 6). Daher lautet die Frage:

Wie können spezifische Informationsbedarfe bzgl. eines Produktionssystems identifiziert und befriedigt werden?

Eine Forschungsempfehlung des ARBEITSKREIS INDUSTRIE 4.0 für diesen Bedarf ist die Untersuchung einer effizienten und nutzerfreundlichen Bereitstellung von Informationen im Produktionsumfeld. Die Anforderung an solch ein Modell ist, dass die Komplexität vor dem Nutzer verborgen und gleichzeitig intuitiv, situationsbezogen und anwendungsgerecht sein muss. Dabei sollten die Aspekte des Data-Mining, Workflow-Unterstützung und des knowledge-based Engineerings untersucht werden (vgl. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V., 2013, S. 98).

Im Rahmen der Arbeit fungiert die Bereitstellung von Prozessinformationen des Produktionssystems einerseits als praktische Zielvorstellung (datenbasierte Prozessinformationsbereitstellung), andererseits auch als initiale Startbedingung (prozessualer Informationsbedarf) des Industrie 4.0-Projektes. Eine adäquate Lösung zur

Informationsbereitstellung geht demnach mit der Prämisse eines vorangehenden Wissenstransfer des Produkt- sowie Produktionsprozesswissens an das interdisziplinäre Team einher. Ein Forschungsziel dieser Arbeit bildet daher die Ermittlung, Gegenüberstellung und bei Bedarf auch Erweiterung von gängigen Methoden zur Informationsbereitstellung sowie dem Anforderungsmanagement mit einhergehendem Wissenstransfer.

Zur Erreichung dieses praktischen Ziels und der Durchführung von bspw. Datenanalysen für einen Informationsgewinn ist ein definierter Bestand an Daten essenziell. In diesem Kontext ist ebenfalls eine klare Methode zur Anforderungsaufnahme notwendig, um Datenmüll im Sinne einer Nicht-Nutzung zu vermeiden. Eine Fragestellung ist daher:

Wie kann ein Produktionssystem modifiziert oder erweitert werden, damit die notwendigen Daten für die Informationsbereitstellung, zur Beherrschung der Systemkomplexität verfügbar werden?

Zu diesem Teilaspekt ist das Handlungsfeld der *Standardisierung und Referenzarchitektur* durch die Forschung zu erweitern. Laut ARBEITSKREIS INDUSTRIE 4.0 gelingt die Implementierung von Industrie 4.0-Technologien in einer interdisziplinären Zusammenarbeit nur unter der Prämisse gemeinsamer, einheitlicher Standards (vgl. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V., 2013, S. 6). Gemäß der ACATECH stellt dieses Defizit für Unternehmen, die am Anfang der digitalen Transformation stehen, die Eintrittshürde in die Digitalisierung dar. Notwendig für die technische Beschreibung und Umsetzung ist eine Referenzarchitektur¹⁰ (vgl. Hirsch-Kreinsen, et al., 2022, S. 6). Daher besteht ein weiterer Forschungsbedarf in der Erarbeitung von Referenzarchitekturen, auf deren Basis Industrie 4.0-Lösungen erarbeitet, aber auch Innovationen schneller in die Wirtschaft vermittelt werden können (vgl. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V., 2013, S. 103). Eine Forschungsempfehlung ist daher die Erarbeitung von Modularisierungs- und Wiederverwendungskonzepten unter Berücksichtigung von qualitativen, quantitativen und technischen Aspekten und dem Austausch einer zugehörigen Best Practice (vgl. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V., 2013, S. 96). Im Kontext der praktischen Umsetzung von Industrie 4.0-Projekten zur Erfüllung einer Informationsbereitstellung im Produktionsumfeld bildet diese Empfehlung ein weiteres Ziel dieser Forschungsarbeit.

¹⁰ „Man spricht von einer Referenzarchitektur, wenn es sich um ein generisches Muster – also eine idealtypische Modellausprägung – für die Klasse der zu modellierenden Systeme und deren Architektur handelt.“ (acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V., 2013, S. 102)

Das wirtschaftliche Ziel zur Beherrschung komplexer Systeme ist mithilfe einer wissenschaftlichen Erweiterung des Handlungsfeldes der Standardisierung und Referenzarchitektur umzusetzen, was primär eine technische Herausforderung darstellt. Die endgültige Nutzung derartiger Lösungen, wie auch die fachspezifischen Impulse, obliegen essentiell dem Fachpersonal mit Produkt- und Produktionsprozesswissen. Menschen, als Wissensträger wie auch Nutzer der finalen digitalen Lösung, bilden eine soziologische Herausforderung des Industrie 4.0-Ansatzes, wie die Studie von ABEL ET AL. zeigt (vgl. Abel, Hirsch-Kreinsen, & Wienzek, 2019). Daher liegt ein bedeutender Fokus dieser Arbeit auf dem sozio-technischen Gestaltungsansatz der Industrie 4.0, welches in das Handlungsfeld der *Arbeitsorganisation und -gestaltung* fällt. Im Gegensatz zu technischen Aspekten sind konkrete Forschungsempfehlungen für den sozio-technischen Gestaltungsansatz vergleichsweise abstrakt gefasst. Einen Punkt hierzu trägt die Erforschung der Akzeptanz von Industrie 4.0-Technologien bei, welche die Prämisse eines Wissenstransfers und der anschließenden Nutzung der Technologien aufstellt. Obwohl der Mensch ein zentrales Schlüsselement im Industrie 4.0-Gedanken ist, ist in der Literatur zu beobachten, dass der sozio-technische Ansatz von vergleichsweise wenigen Forschungsarbeiten (ca. 2,8% bis 3,5% der Veröffentlichungen in Scopus zu Industrie 4.0) aufgegriffen wird (s. Tab. 1-1)

Suchstring in Scopus	Anzahl der Treffer zur Dokumentensuche	Verhältnis
TITLE-ABS-KEY ("industrie 4.0")	1414	
TITLE-ABS-KEY ("industrie 4.0") AND (ALL (sociotechnic*) OR ALL (socio-technic*))	50	~3,5%
TITLE-ABS-KEY ("industry 4.0")	29.809	
TITLE-ABS-KEY ("industry 4.0") AND (ALL (sociotechnic*) OR ALL (socio-technic*))	829	~2,8%

Tab. 1-1: Literaturreview zu Veröffentlichungen mit sozio-technischem Gestaltungsansatz im Kontext der Industrie 4.0

Eigene Darstellung auf Basis von Scopus

Die Erweiterung des Forschungsziels dieser Arbeit besteht daher im Aspekt der interdisziplinären Zusammenarbeit. Die Voraussetzung hierfür ist der sprachliche wie auch technologische Konsens aller beteiligten Domänen und die aktive Einbindung der Wissensträger aus dem Produktionsumfeld in den Industrie 4.0-Ansatz dieser Arbeit.

Zusammenfassend ist demnach zu sagen, dass das erste Forschungsziel dieser Arbeit der Aufnahme der konkreten Ausgangs- sowie Zieldefinition des Produktionsumfeldes dient. Eine Industrie 4.0-Lösung für die Informationsbereitstellung ist mit einer klaren Zielvorstellung zu erarbeiten. Ausgeschlossen ist die pauschale Datengewinnung ohne konkretes Anwendungsszenario. Darauf aufbauend leitet sich das zweite Forschungsziel

einer modularen Methodik anhand einer generischen Referenzarchitektur für die sozio-technische Umsetzung einer Industrie 4.0-Lösung ab.

1.4.2 Wissenschaftliche Methode und Aufbau der Arbeit

Der praktische Nutzen in der Industrie ist der primäre Anspruch an diese wissenschaftliche Arbeit. Eine Brücke zwischen der Wissenschaft und der Praxis bildet der konstruktionswissenschaftliche Ansatz der Design Science (vgl. Seckler, Mauer, & vom Brocke, 2021, S. 2). Daher folgt diese Arbeit dem Design Science nach HEVNER ET AL. (vgl. Hevner, March, Park, & Ram, 2004). Der gewählte Forschungsansatz des Design Science umfasst die sieben folgenden Maxime (von der Dovenmühle, 2018, S. 15f)¹¹:

1. *Entwurf eines Gegenstandes*: Konstruktionswissenschaftlich orientierte Forschung muss einen nützlichen Gegenstand in Form einer Konstruktion, eines Modells, einer Methode oder einer nutzbaren Instanz als Ergebnis vorweisen.
2. *Relevanz der Problemstellung*: Das Ziel der Forschung ist die Entwicklung technischer Lösungen für maßgeblich betriebliche Problemstellungen.
3. *Bewertung*: Die Nützlichkeit, Qualität und Wirksamkeit des entworfenen Gegenstands muss mittels korrekt genutzter Bewertungsmethoden nachgewiesen werden.
4. *Forschungsbeitrag*: Konstruktionsorientierte Forschung muss eindeutige und überprüfbare Beiträge in den Bereichen Entwurf, Entwurfsgrundlagen und/oder Entwurfsmethodik bereitstellen.
5. *Wissenschaftliche Genauigkeit*: Konstruktionsorientierte Forschung beruht auf exakten Methoden sowohl beim Entwurf als auch bei der Bewertung des Konstruktionsgegenstandes.
6. *Entwicklung als Identifikationsprozess*: Die Identifikation hilfreicher Gegenstände unter Einsatz vorhandener Mittel, um das Ziel unter Berücksichtigung der Anforderungen des Problemumfeldes zu erfüllen.
7. *Kommunikation der Forschungsergebnisse*: Die Ergebnisse konstruktionsorientierter Forschung müssen in einer Form präsentiert werden,

¹¹ Übersetzung der Originalquelle (Hevner, March, Park, & Ram, 2004, S. 83)

welche die Zielgruppe Management/ Organisation in gleicher Weise anspricht wie eine technisch orientierte Gruppe.

Die im Rahmen dieser Arbeit präsentierte Referenzarchitektur (s. Kapitel 4.2) und der zugehörige Leitfaden (s. Kapitel 5) bilden den Entwurfsgegenstand (Kriterium 1). Diese bezieht sich auf die konkrete Problemstellung (s. Kapitel 1.2) der bislang fehlenden Strategiefähigkeit bei der Umsetzung von Industrie 4.0-Vorhaben in der industriellen Praxis (Kriterium 2). Die gewählte Bewertungsmethode umfasst eine prototypische Anwendung des Entwurfsgegenstandes (s. Kapitel 6) unter der Berücksichtigung des sozio-technischen Gestaltungsansatzes (Kriterium 3). Der Forschungsbeitrag ordnet sich in die durch den ARBEITSKREIS INDUSTRIE 4.0 formulierten Handlungsfelder basierend auf konkreten Forschungsempfehlungen ein (vgl. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V., 2013) (s. Kapitel 1.4.2) (Kriterium 4). Die wissenschaftliche Genauigkeit wird durch die Einhaltung bekannter Richtlinien und Anforderungen gewährleistet. Die Identifikation bereits vorhandener, hilfreicher Mittel erfolgt auf Basis der Adaption etablierter wissenschaftlicher Modelle (wie bspw. der Industrie 4.0-Komponente) (Kriterium 6). Die Kommunikation der Forschungsergebnisse visiert konkret die Zielgruppe der Beschäftigten in Industriebetrieben an, die nicht in jedem Fall einen wissenschaftlichen Ausbildungshintergrund aufweisen (Kriterium 7). Die Kommunikation der entwickelten Erkenntnisse soll aufgrund der angeführten prototypischen Anwendung die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse erleichtern.

2 Theoretischer Bezugsrahmen

Der theoretische Bezugsrahmen dieser Arbeit umfasst vier Themengebiete. Kapitel 2.1 grenzt den Rahmen der Arbeit auf die Produktion in Industriebetrieben ein. Es folgt eine detaillierte Analyse des Industrie 4.0-Begriffes. Es wird dargestellt, dass die Industrie 4.0 im Rahmen dieser Arbeit das Ziel der datenbasierten Informationsbereitstellung für den Menschen darstellt. Der Vergleich der konventionellen Informationsbereitstellung mit dem modernen Ansatz zur Beherrschung der Produktionsprozesskomplexität wird in Kapitel 2.3 behandelt. Letztlich wird hergeleitet, dass es sich bei heutigen Produktionssystemen in Industriebetrieben um sozio-technische Systeme handelt.

2.1 Interdisziplinäre Zusammenarbeit im Industriebetrieb

Dieser Abschnitt beschreibt den Unterschied zwischen Industrie- und Handwerksbetrieben. Es wird die historische Entwicklung von Industriebetrieben mit Fokus auf der Produktionstechnik aufgezeigt. Industriebetriebe in der heutigen Form sind von Arbeitsteilung geprägt, welches anhand typischer Betriebsstrukturen ablesbar ist. Die entstandenen Funktionsbereiche erfordern ein hohes Maß an interdisziplinärer Zusammenarbeit, welches eine betriebliche Herausforderung darstellt. Die Faktoren dieser Herausforderungen und Lösungsansätze, um die interdisziplinäre Zusammenarbeit in Industriebetrieben zu ermöglichen, werden aufgezeigt.

2.1.1 Historische Eckdaten der Industrie

Die Aufarbeitung der Historie der Industrie beginnt zwangsläufig mit der Begriffsklärung, was unter einem Industriebetrieb zu verstehen ist. Gemäß BUDÄUS lässt sich der Fokus von Industriebetrieben allgemein mit der Gewinnung, Be- und Verarbeitung von (Roh-)Stoffen zu Produkten beschreiben. Indikatoren für ihrer Unterscheidung von Handwerksbetrieben sind:

- Produktionsfunktion
- Hoher Grad an Arbeitsteilung
- Hohes Spektrum an Arbeitskräften mit unterschiedlichem Qualifikationsprofil
- Hoher Grad an Mechanisierung und Automatisierung
- Normierung und Typisierung des Produktionsverfahrens

- Auslegung des Leistungsprogramm für einen größeren, teilweise globalen Markt

Diese Indikatoren können durchaus fließend ineinander übergehen, weshalb rein formal die Unterscheidung dieser beiden Arten von Betrieben nur durch ihre Mitgliedschaft bei der Industrie und Handelskammer bzw. der Handwerkskammer fest vorgenommen werden kann. Im allgemeinen Begriffsverständnis wird Lesern allerdings implizit klar, wovon die Rede im Sinne eines Industriebetriebes ist. Diese zeichnen sich insbesondere durch die Betriebs- und Einflussgröße aus und stehen inhaltlich demnach vor anderen Herausforderungen als Handwerksbetriebe (vgl. Budäus, 1990, S. 5) (s. a. Haupt, 2000, S. 8).

Die zentrale Aufgabe eines Industriebetriebes stellt demnach die Produktionstechnologie dar. Aus BUDÄUS Aufzählung von Indikationsmerkmalen geht hervor, dass sich die heutige Produktionstechnologie in Industriebetrieben durch einen hohen Grad der Automatisierung auszeichnet. SPUR arbeitet die Historie der uns heute bekannten Produktionstechnologie auf, welche bis in die Steinzeit zurückreicht. Die Geschichte des Werkzeuges beginnt mit der manuellen Bearbeitung per Hand, welche die Grundlage für die Zufriedenstellung der Lebensbedürfnisse, wie Nahrungsversorgung oder Verteidigung, bildet. Durch die Kombination mechanischer Prozesse, wie bspw. der Hebelwirkung, entwickelte der Mensch über einen jahrtausendelangen Prozess erste Gerätschaften, die den Vorläufer der heutigen Maschinen bilden. Es folgten die Kraftmaschinen, die thermische, elektrische oder chemische Energie in mechanische Energieformen umwandeln (vgl. Spur, 1979, S. 27ff, 67-72, 98-108). Einen weiteren Sprung erlebte die Produktionstechnik durch die Integration von Informationstechnik seit den 1980er Jahren.

Diese ist, im Vergleich zu der Produktionstechnik, ein junges Feld. Die Wichtigkeit der modernen Informatik beginnt laut BRUDERER im Jahr 1936 mit der Turingmaschine von Alan Turing. Mit ihr gelang die Entschlüsselung der bis dato als unlösbar geltenden Enigma-Verschlüsselung, welche das Ende des zweiten Weltkrieges zur Folge hatte. Die Von-Neumann-Architektur (1945) stellt die erste Form des heute bekannten Computers dar, welche auf John von Neumann zurückzuführen ist. Dieser beschrieb mit seiner Architektur erstmalig das allgemeentheoretische Konzept eines speicherprogrammierten elektronischen Digitalrechners (vgl. Bruderer, 2012, S. 48, 52). SAMMET fasst zusammen, dass von Neumann u.a. mit Grace Hopper im Rahmen des Manhattan-Projekts zusammengearbeitet hat. Mit ihrer Entwicklung der Programmiersprache „COBOL“ und dem ersten Compiler gilt Hopper als eine weitere Schlüsselfigur in der Historie der Informatik (vgl. Sammet, 1992).

Gemäß RECHENBERG ET AL. stellte die Firma Intel im Jahre 1971 ihren Intel® 4004 Mikroprozessor vor und läutete damit die Ära der Halbleitertechnologie ein. Das Moore'sche Gesetz beschreibt, dass jeher rund alle 18 Monate die Anzahl der Transisterfunktionen auf einem Halbleiterbaustein verdoppelt wird. Dieser Effekt zeigt eine Steigerung der Rechenleistung bei gleicher Bauraumausnutzung (vgl. Rechenberg & Pomberger, 2006, S. 335f). Nach SPUR folgte der Entwicklung der Halbleitertechnologie in den 1980/90er Jahren der historische Anknüpfungspunkt an die Produktionstechnik (vgl. Spur, 1979, S. 206-211).

Die Nutzung eines Computers als Lösungswerkzeug von Aufgaben wird laut RECHENBERG ET AL. als das Feld der „Angewandten Informatik“ bezeichnet. In Bezug auf die Produktionstechnik beinhaltet das die Automatisierungstechnik, rechnerintegrierte Fertigung (engl. „computer-integrated manufacturing“, kurz CIM), aber auch Datenbanksysteme und weitere Disziplinen (vgl. Rechenberg & Pomberger, 2006, S. 853f).

Die Integration der Informationstechnologie als Werkzeug steigt in der Produktionstechnik zunehmend an. Das Qualifikationsprofil der Beschäftigten verschiebt sich. Insgesamt steigt das Spektrum der Kompetenzfelder von Personal in Industriebetrieben stetig. Parallel müssen die heterogenen Gewerke gemeinsam die Produktionsfunktion des Betriebes sicherstellen. Dieses gelingt jedoch nur durch eine funktionierende, interdisziplinäre Zusammenarbeit.

2.1.2 Herausforderungen und Hindernisse der interdisziplinären Zusammenarbeit in Industriebetrieben

Das Hauptziel von Industriebetrieben ist die Herstellung von Produkten in größerer Stückzahl. Die Erreichung dieses Ziels erfordert ein gewisses Maß an Arbeitsteilung, durch die sich Industriebetriebe auszeichnen. Typische Funktionen innerhalb einer Organisationsstruktur liegen gemäß der Aufführung von SCHEER in folgender, oder ähnlicher, Form vor:

- Marketing/ Vertrieb,
- Technik (Forschung und Entwicklung),
- Produktion,
- Beschaffung,
- Personal,

- Finanz- und Rechnungswesen.

Das Y-CIM-Modell deutet an, wie diese Funktionsbereiche eines Betriebes Schnittstellen zueinander bilden (vgl. Scheer, 1995, S. 30, 87).

Die unternehmensseitige Notwendigkeit der verschiedenen Funktionsbereiche führt zu einem breiten Qualifikationsspektrum (Fachkompetenz im eigenen und fremden Funktionsbereich, allgemeines Erfahrungswissen, Ausbildungsgrad, etc.) des Personals. Dies hat durchaus positive Aspekte, wie eine Arbeitsteilung nach den jeweiligen Fachkompetenzen, zur Folge. Allerdings entstehen bei der Erfüllung der Unternehmensziele auch Herausforderungen in der interdisziplinären Zusammenarbeit. In einer Zusammenfassung von CLAUS ET AL. können u.a. folgende Herausforderungen in der interdisziplinären Zusammenarbeit auftreten:

- Kommunikation über Fächergrenzen hinweg,
- mangelndes Verständnis für die Gegebenheiten in anderen Fachbereichen,
- mangelndes Verständnis für die Expertise der anderen Personen.

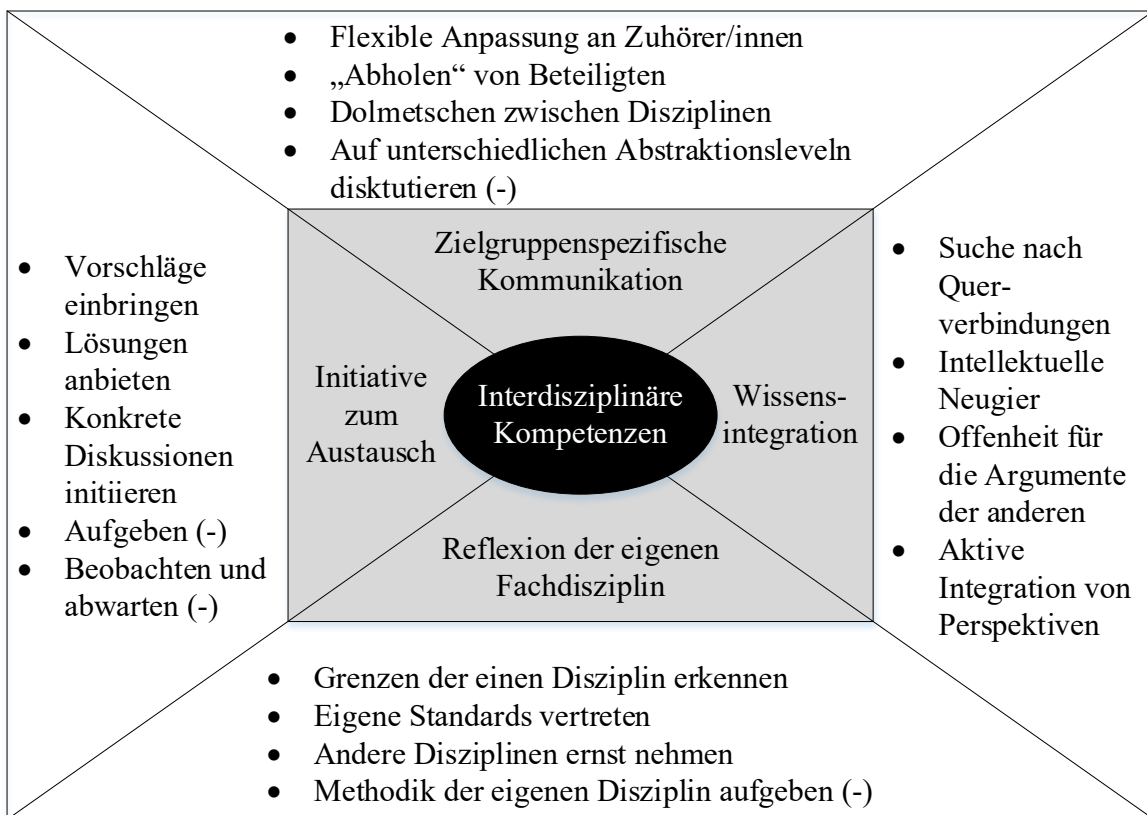


Abb. 2-1: Modell interdisziplinärer Kompetenzen mit Verhaltensbeispielen

Eigene Darstellung in Anlehnung an (vgl. Claus & Wiese, 2021, S. 282)

Die Ursachen für die Herausforderungen der Interdisziplinarität stehen in Zusammenhang mit den spezifischen Entwicklungshistorien der Mitarbeitenden. Mögliche Einflussfaktoren stellen bspw. die Prägung der eigenen beruflichen Identität durch die jeweilige Fachdisziplin, organisationsspezifische Identifikationsmuster oder die hohe Perspektivenvielfalt durch Diversität dar (vgl. Claus & Wiese, 2021, S. 280).

Die Problemlösung gelingt nach Claus et al. nur über die Herstellung von Querverbindungen zwischen den Methoden, Theorien und Wissensinhalten der Funktionsbereiche. Zusätzlich besteht der Anspruch an spezifische kommunikative Kompetenzen der beteiligten Personen. Das Modell mit konkreten Verhaltensbeispielen der Autorinnen soll die notwendigen Kompetenzen verdeutlichen (s. Abb. 2-1).

Die funktionierende Interdisziplinarität innerhalb der Funktionsbereiche eines Industriebetriebes ist demnach ein notwendiger Erfolgsfaktor. Ihre Sicherstellung gestaltet sich jedoch nicht trivial und Bedarf einer einheitlichen Unternehmenskultur sowie entsprechenden funktionalen Hilfsmitteln. Ein erfolgreiches Unternehmen profitiert von der starken Kapselung von Kompetenzen, also der Anerkennung der Spezialisierung von Experten in unterschiedlichen Domänen, und zugleich einer losen Kopplung der Funktionsbereiche. An den Schnittstellen dieser Kopplung sind geeignete Methoden bereitzustellen, um eine erfolgreiche Kommunikation zur gemeinsamen Erreichung von Unternehmenszielen zu gewährleisten.

2.2 Industrie 4.0 zur Beherrschung der Produktionssystemkomplexität

Der nächste Schritt in der Historie der Industriebetriebe wird mit dem Begriff „Industrie 4.0“ bezeichnet. Im allgemeinsprachlichen Gebrauch deutet dieser Begriff auf eine vierte industrielle Revolution hin. Nutzer dieses Begriffes stehen Kritikern gegenüber, die eine unzureichende Definition und inflationäre Ausnutzung als „Alles-oder-Nichts-Begriff“ bemängeln.

Dieser Abschnitt zeigt die ursprüngliche Intention zur Industrie 4.0, indem die Initiatoren und Geschichte beleuchtet werden. Das Verständnis des Gesamtzusammenhanges wird gebildet, indem die Industrialisierung und Wirtschaftssektoren detailliert gezeigt werden. Es stellt sich die Frage, ob die Bezeichnung einer vierten industriellen Revolution grundsätzlich zulässig ist. Um etwas zu dieser Debatte beizusteuern, werden die sich ähnelnden Faktoren einer industriellen Revolution verschiedener Stakeholder gezeigt und Indikatoren in der Volkswirtschaft erarbeitet. Die Synonymbildung zwischen den Begriffen „Digitalisierung“

und „Industrie 4.0“ wird in dieser Arbeit allerdings als unzulässig erachtet. Dieser Abschnitt gibt Aufschluss darüber, inwiefern sich diese beiden Begrifflichkeiten differenzieren.

Letztlich wird gezeigt, dass die Industrie 4.0 nicht nur ein deutsches Phänomen ist. International verfolgen verschiedene Akteure ähnliche Strategien unter teilweise gänzlich abweichenden Bezeichnungen. Der Leser erhält abschließend einen Einblick in die internationalen Initiativen, die mit dem deutschen Konzept verwandt sind.

2.2.1 Initiatoren und Geschichte

Die erstmalige Einführung des Begriffes „Industrie 4.0“ erfolgte auf der Hannover Messe im April 2011 in Persona von Hennig Kagermann (Präsident der Akademie der Technikwissenschaften), Wolf-Dieter Lukas (Abteilungsleiter „Schlüsseltechnologien – Forschung und Innovation“ im Bundesministerium für Bildung und Forschung) und Wolfgang Wahlster (Geschäftsführer des Deutschen Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH). Zu dieser Zeit konnte sich Deutschland gemäß KAGERMANN ET AL., trotz der Hochlohnregion und den wirtschaftlichen Auswirkungen der Finanzkrise, als Produktionsstandort behaupten. Der Erhalt dieser Stellung im globalen Wettbewerb sehen die Autoren folgendermaßen: *„Durch die digitale Veredelung von Produktionsanlagen und industriellen Erzeugnissen bis hin zu Alltagsprodukten mit integrierten Speicher- und Kommunikationsfähigkeiten, Funksensoren, eingebetteten Aktuatoren und intelligenten Softwaresystemen entsteht hier eine Brücke zwischen virtueller („cyber space“) und dinglicher Welt bis hin zur wechselseitigen feingranularen Synchronisation zwischen digitalem Modell und der physischen Realität.“* (Kagermann, Lukas, & Wahlster, 2011). Nach KAGERMANN ET AL. bildet die Basis für diesen Ansatz die Erweiterung der bereits vorhandenen Automatisierungstechnik um softwaretechnische Komponenten, die sogenannte digitale Transformation, wodurch die klassischen Produktionsanlagen zu cyber-physischen Systemen (CPS) werden. Diese Systeme tauschen Informationen von physischen Objekten über das Internet der Dinge (engl. „Internet of Things“, kurz IoT) aus, wodurch bspw. eine aktive Modifikation des Material- oder Produktionsflusses ermöglicht werden soll. Die Vision umfasst eine vertikale Vernetzung der Produkte mit betriebswirtschaftlicher Anwendungssoftware bspw. zur Optimierung der Produktions- und Logistikkette. Die Industrie 4.0 ist ein Deckelbegriff, der neuartige Geschäftsmodelle auf Basis des IoT und Informationen aus CPS, meint (vgl. Kagermann, Lukas, & Wahlster, 2011) (vgl. Wissenschaftliche Dienste Deutscher Bundestag, 2016).

Zur Förderung dieser Vision am Produktionsstandort Deutschland wurde die „Plattform Industrie 4.0“ im Jahr 2013 unter der Leitung des Bundesministeriums für Wirtschaft und

Klima (BMWK), des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) und weiteren Vertretern aus der Wirtschaft, Gewerkschaft und Wissenschaft gegründet (vgl. BMWK, 2022a). Die Aufgaben dieser Plattform bestehen in der Mitwirkung an internationalen Standardisierungsprozessen, der Entwicklung vorwettbewerblicher Konzepte und Lösungen sowie deren Überführung in die Praxis durch die Formulierung von Handlungsempfehlungen, Informationsangeboten und Anwendungsbeispielen für Unternehmen (vgl. BMWK, 2022b). Mit ihrem Abschlussbericht „Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0“ im Jahr 2013 veröffentlichte die Plattform Industrie 4.0 eine erste Konzeptkonkretisierung für das Zukunftsprojekt. Damit wurde der Startschuss für die wissenschaftliche und wirtschaftliche Erarbeitung gesetzt.

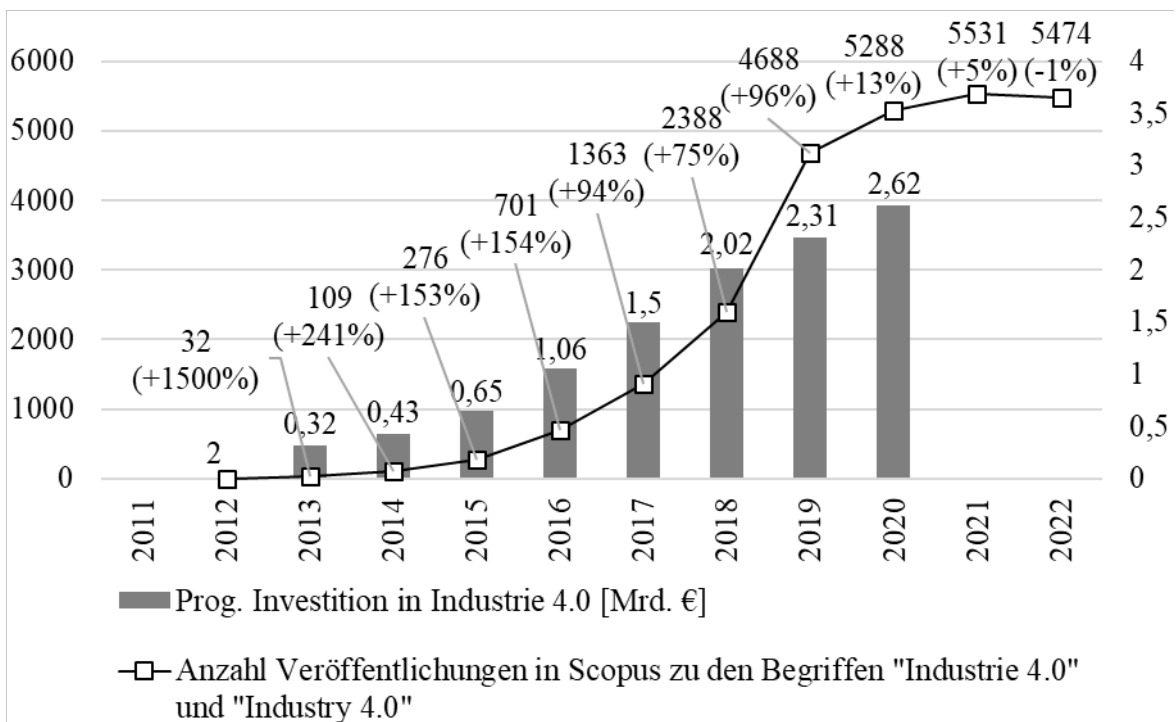


Abb. 2-2: Jährliche Anzahl der Veröffentlichungen zu den Begriffen „Industrie 4.0“ und „Industry 4.0“ und prognostiziertes Investment in das Themenfeld

Eigene Darstellung auf Basis von (vgl. Bitkom, 2014) und Scopus

Prognostiziert wurde daraufhin im Jahre 2014 ein kontinuierlich steigendes, jährliches Investment in die Industrie 4.0 (Bitkom, 2014). In der Retrospektive spiegelt die Entwicklung der, im Scopus geleisteten, jährlichen Veröffentlichungen zu den Begriffen „Industrie 4.0“ und „Industry 4.0“ die reale Popularität wider. Der stagnierende Kurvenverlauf in Abb. 2-2 lässt vermuten, dass seit 2019 die Welle der Euphorie aus wissenschaftlicher Sicht nachgelassen hat. Seit 2021 ist ein drastischer Rückgang der

Veröffentlichungen zu diesem Thema zu erkennen. Es stellt sich die Frage, welchen Hintergrund das rückläufige Interesse der Wissenschaft hat.

Auf Basis eines tiefer reichenden Literaturreviews von WANG ET AL. wird dargelegt, dass das Interesse an dem Themengebiet nicht vergangen ist. Das Ziel sei noch immer die Industrie 4.0 zu erreichen, doch für ihre Umsetzung ist die Digitalisierung, konkreter die Konnektivität, unabdingbar (s. Abb. 2-6). Weiter richtet sich in diesem Kontext der wissenschaftliche Bedarf auf die Datenanalyse und die Rolle des Menschen in solch einem Produktionssystem. In der Zusammenfassung ihrer evolutionären Analyse des Themengebietes wird aufgezeigt, dass der aktuelle Forschungsfokus u.a. auf Entwicklungsstrategien der digitalen Transformation liegt, um den Anschluss von Unternehmen an die Zukunftsvision der Industrie 4.0 zu ermöglichen (vgl. Wang, et al., 2021, S. 746).

2.2.2 Die industriellen Revolutionen und Einordnung des heutigen Industrie 4.0-Begriffes

Der Industrie 4.0-Begriff referenziert sprachlich auf die vergangenen industriellen Revolutionen, einem Wandlungsprozess von Volkswirtschaften von der primären Zivilisation zur modernen Industriegesellschaft. In der allgemeinen Literatur wird der Begriff mit eben diesen historischen Wandlungsprozessen in ihrer Wirkung auf die Volkswirtschaft durch die Bezeichnung „vierte industrielle Revolution“ gleichgesetzt. Im ersten Teil des Abschnittes wird der Frage nachgegangen, was unter einer industriellen Revolution zu verstehen ist, welche Faktoren sie auszeichnet und welche Vorbedingungen erfüllt werden müssen, damit sie eintritt. Weiter werden im zweiten Teil die Auswirkungen auf die Wirtschaft und Gesellschaft behandelt. Mit der Zusammenfassung der ersten drei industriellen Revolutionen und ihren Charakteristika bildet die Fragestellung, ob in der heutigen Zeit von einer „vierten industriellen Revolution“ gesprochen werden kann, den Abschluss dieses Kapitels.

Was ist überhaupt eine industrielle Revolution und was zeichnet sie aus?

Die „industrielle Revolution“ wurde durch französische Autoren zu Beginn des 19. Jahrhunderts als Bezeichnung des qualitativen Wandels mechanisierter Produktionsprozesse eingeführt. Laut HAHN übernahm Arnold Toynbee im Jahr 1884 den Begriff in sein Werk „Lectures on the Industrial Revolution in England“, wodurch die Bezeichnung auch in den allgemeinen Sprachgebrauch übergegangen ist (vgl. Hahn, 2011, S. 51f). Im deutschsprachigen Raum finden die beiden Begriffe „industrielle Revolution“ und

„Industrialisierung“ gleichermaßen Verwendungen. Laut KIESEWETTER verwandten Marxisten eher ersteren, Nicht-Marxisten eher zweiten Begriff, meinen jedoch inhaltlich dasselbe (vgl. Kiesewetter, 2004, S. 16f)¹². „*Sie [die Begriffe „industrielle Revolution“ und „Industrialisierung“] sollen sich vor allem auf den Vorgang des umwälzenden ökonomischen, politischen und sozialen Modernisierungsprozesses während einer längeren Periode beziehen. Industrielle Revolution oder Industrialisierung wird auch nicht eingeeengt auf Erfindungen, technische Innovationen oder die kapitalintensive Fabrikproduktion. Sie umfaßt den durch agrarischen, sozialen, politischen und wirtschaftlichen Wandel ausgelösten Umbruch [im Sinne einer Weiterentwicklung] ganzer Gesellschaften bzw. Staaten auf dem Weg zur modernen Industriegesellschaft*“ (Kiesewetter, 2004, S. 19). Aufgrund Ergänzung ihrer Evolutionsstufe (1 bis 3) bietet die Bezeichnung „industrielle Revolution“ sprachlich eine Differenzierungsmöglichkeit der historischen Meilensteine.

Im Detail beschäftigen sich zahlreiche Arbeiten mit den wirtschaftlichen, sozialen, kulturellen und politischen Vorbedingungen, an die eine industrielle Revolution geknüpft ist¹³. Die Wichtigkeit und die Auswirkungen dieser Vorbedingungen sind im internationalen Vergleich erkenntlich. Einigkeit unter den Historikern herrscht darin, dass eine entscheidende Vorabbedingung für eine industrielle Revolution eine technische Revolution ist: „*only one of the factors represents a sufficient condition, because it alone could have induced the others: That factor is technology*“ (Hahn, 2011, S. 60)¹⁴.

Welche messbaren Effekte sind in der Wirtschaft und Gesellschaft erkennbar?

Indizien für die vergangenen industriellen Revolutionen und ihre Auswirkungen können anhand verschiedener Kriterien beobachtet werden. So wie es wirtschaftliche, soziale, kulturelle und politische Voraussetzungen für den Wandel benötigt, werden ebendiese wieder von dem industriellen Wandel beeinflusst. Historische Daten zur Repräsentation des Wohlstandes, der Population, Produktivität, Einflüsse auf die Umwelt, Ressourcennutzung und Bildung können betrachtet werden, um beispielhaft einige Kennzahlen zu nennen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass jedes der betrachteten Kriterien u.a. ebenfalls politischen, ökonomischen wie auch ökologischen Einflüssen unterlegen ist.

¹² (s. a. Hahn, 2011, S. 56f)

¹³ (s. a. Kiesewetter, 1996) (s. a. Hahn, 2011, S. 59-76)

¹⁴ Aus (Geary, 1982)

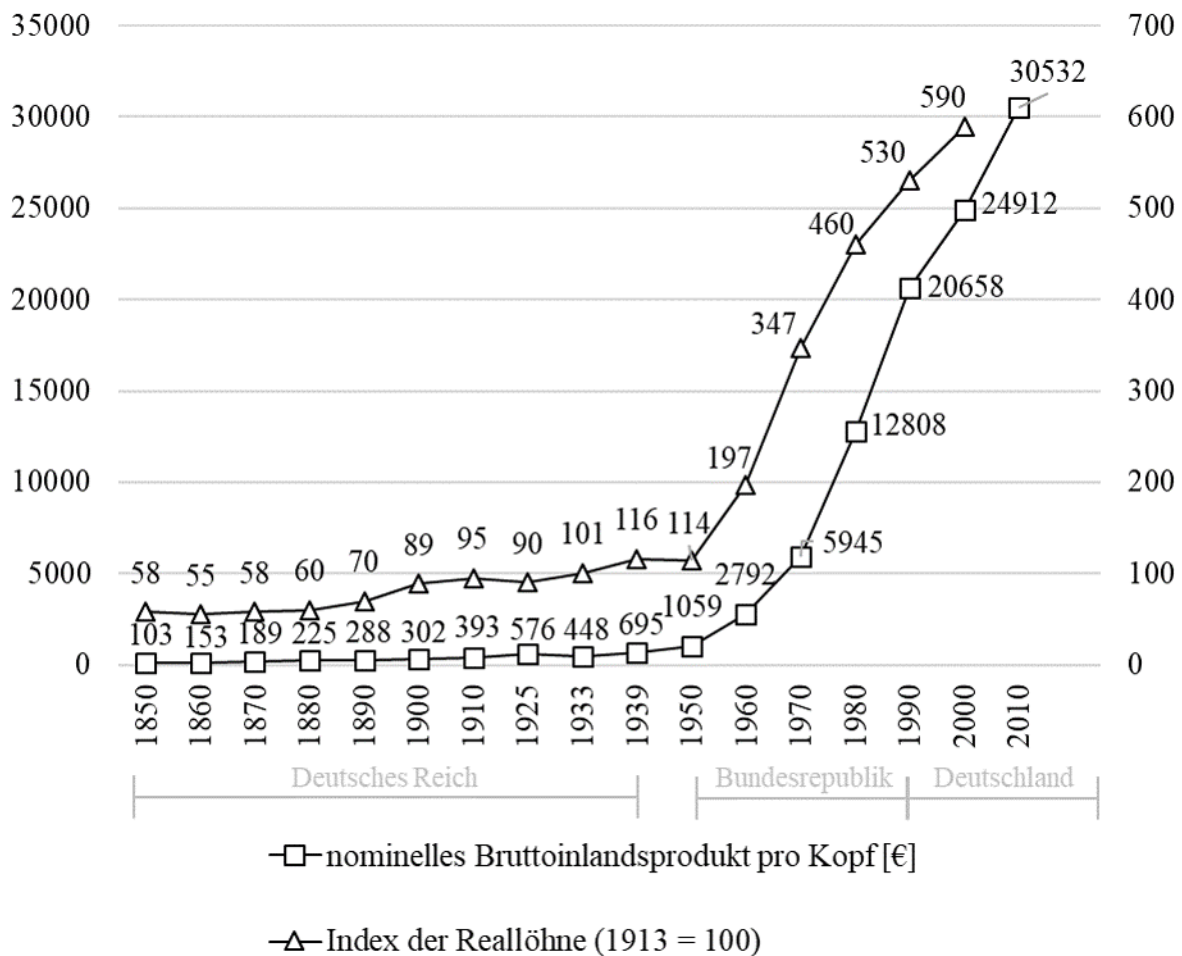


Abb. 2-3: Entwicklung des nominellen BIP und Reallöhne in Deutschland seit 1850

Eigene Darstellung in Anlehnung an (vgl. Rahlf, 2015, S. 148)

Ein zu betrachtendes Szenario ist die Zunahme des Wohlstandes durch Effizienzsteigerung. Der Wohlstandindikator einer Volkswirtschaft lässt sich allerdings schwer bestimmen, da schon der alleinige Begriff in drei Dimensionen unterschieden wird: materieller Wohlstand, persönliches Wohlbefinden im Sinne von Lebensqualität als auch der umweltökonomischen Gesamtrechnung (vgl. Pollert, Kirchner, & Polzin, 2008, S. 59). Das Bruttoinlandsprodukt (BIP) pro Kopf wird als ein möglicher Indikator für den Wohlstand genannt und gleichzeitig häufig als unzulänglich kritisiert. Seit 1990 soll gemäß RAHLF hierfür der Human Development Index (HDI) Abhilfe schaffen (vgl. Rahlf, 2015, S. 150f). Der HDI setzt sich aus mehreren Berechnungskomponenten bzgl. der Gesundheit, Bildung und Lebensstandard zusammen (vgl. United Nations Development Programme, 1990, S. 109). Für eine Langzeitbetrachtung gibt es allerdings keine zuverlässige historische Rückrechnung des HDI, die mit den seit 1990 veröffentlichten Angaben der United Nations Development

Programme (UNDP) übereinstimmen¹⁵. Eine historische Betrachtung über den materiellen Wohlstand der deutschen Bevölkerung, bereinigt von unternehmerischen, staatlichen als auch ausländischen Ansprüchen, ist über die Lohnentwicklung möglich (vgl. Rahlf, 2015, S. 148) (s. Abb. 2-3).

Die Entwicklung des Index der Reallöhne zeigt, dass sich die Einkünfte in Deutschland zwischen 1850 (58) und 1913 (100) nahezu verdoppelt haben. Eine mögliche Begründung für diesen Zugewinn ist die Steigerung der Produktivität einer Arbeitskraft durch die Zuhilfenahme neuer Technologien (bspw. Maschinen in der Landwirtschaft, Düngemittel, usw.) parallel zur menschlichen Arbeitskraft. Diese Darstellung untermauert die Argumentation in der Literatur, dass politische Ereignisse, wie in diesem Beispiel der erste und zweite Weltkrieg, ein deutliches Hemmnis des industriellen Fortschrittes darstellen können, obgleich die Technik vorhanden und nutzbar ist. Nach den Weltkriegen wurden die Bedingungen für den industriellen Fortschritt geebnet, was durch den Anstieg der Reallöhne auf einen 4- bis 5-fachen Faktor sichtbar wird. Während das nominelle BIP seit den Kriegsjahren gleichbleibend steigt, flacht der Anstieg der Reallöhne seit den 1980er-Jahren zunehmend ab.

Eine weitere Auswirkung der industriellen Revolutionen ist gemäß HAHN an dem Wandel der Form des Erwerbs in der Gesellschaft zu erkennen (vgl. Hahn, 2011, S. 2). Nach FÄHNRICH ET AL. wird die Wirtschaft in die folgenden drei Sektoren unterteilt:

- Primärsektor: Urproduktion. „*Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Tierhaltung, Fischerei und Jagd*“ (Hohls, 2005, S. 3). Diese unterliegen einer konstanten Nachfrage und mäßigem Anstieg der Arbeitsproduktivität durch technischen Fortschritt (Primäre Zivilisation).
- Sekundärsektor: Industrie. „*Verarbeitende Fabrikation in Industrie und Handwerk, Bergbau, Energiewirtschaft und das gesamte Waren produzierende Gewerbe*“ (Hohls, 2005, S. 3). Diese unterliegen einer moderaten Nachfrageelastizität und großem Anstieg der Arbeitsproduktivität durch technischen Fortschritt (Übergangsperiode).
- Tertiärsektor: Dienstleistungen. „*Unternehmen und Mitarbeiter der privaten, öffentlichen und sozialen Dienstleistungen einschließlich Bildung, Erziehung und Wissenschaft sowie Handel, Transport, Banken, Versicherungen und öffentliche Verwaltung*“ (Hohls, 2005, S. 3). Diese unterliegen einer hohen Nachfrageelastizität und

¹⁵ Zwei, dem UNDP widersprechende, Beispiele liefern CRAFTS und ROSER (vgl. Crafts, 1997) (vgl. Roser, 2014)

keinem/ geringem Anstieg der Arbeitsproduktivität durch technischen Fortschritt (Tertiäre Zivilisation).

(Vgl. Fähnrich & Opitz, 2006)

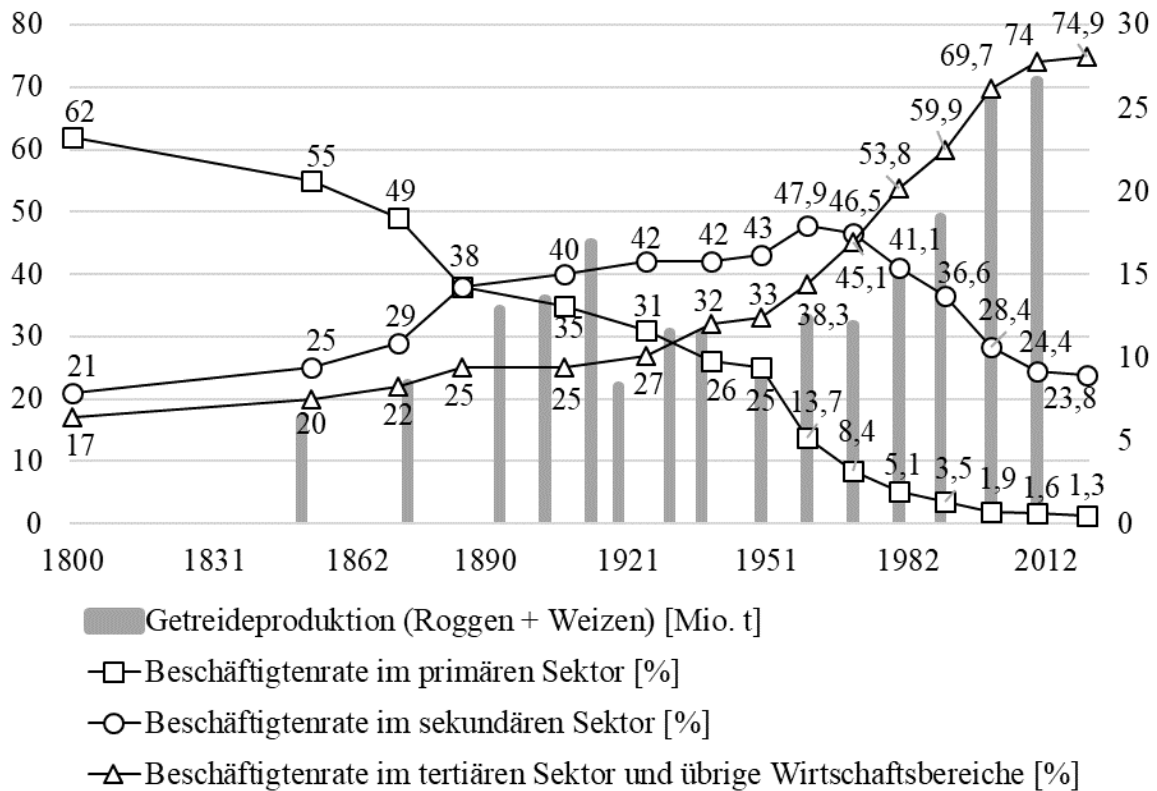


Abb. 2-4: Getreideproduktion und Erwerbstätige nach Wirtschaftssektoren seit 1880

Eigene Darstellung in Anlehnung an (vgl. Rahlf, 2015, S. 244) und (vgl. Statistisches Bundesamt, 2022)

Die Abb. 2-4 zeigt die prozentuale Beschäftigung von Arbeitnehmern in Wirtschaftssektoren¹⁶. Im Jahr 1800 waren ca. 2/3 der Beschäftigten im primären Sektor, also der Land-, Forstwirtschaft und Fischerei, tätig. Bis in das Jahr 1885 hat sich die Beschäftigungsrate im primären Sektor nahezu halbiert. Gleichzeitig hat der sekundäre Sektor, also das produzierende Gewerbe, im selben Zeitraum durch die näherungsweise Verdopplung der Beschäftigungsrate deutlich an Bedeutung gewonnen. Der parallele Reallohnanstieg zu dieser Zeit (s. Abb. 2-3) stützt die Argumentation, dass durch diesen Wandel der Beschäftigungsart eine höhere Produktivität der Gesellschaft auch zu höherem Wohlstand geführt hat. Obwohl die Beschäftigungszahlen im primären Sektor bis zur

¹⁶ Eine Problematik bei der Betrachtung der Wirtschaftssektoren entsteht aufgrund des Wandels der Klassifikationen der Sektoren im Laufe der Zeit (vgl. Rahlf, 2015, S. 192). Auch die Erhebungssystematik, und damit die Zuordnung der Berufe, in die bestimmten Branchen hat sich im Laufe der Zeit gewandelt (vgl. Rahlf, 2015, S. 147).

heutigen Zeit kontinuierlich gefallen sind, konnte durch die Nutzung technischer Hilfsmittel die Produktivität von bspw. der Getreideernte (mit Ausnahme der Kriegszeiten¹⁷) gesteigert werden. 1960 hat die Beschäftigungsrate im sekundären Sektor mit 47,9% den Höhepunkt erreicht und stabilisiert sich um ca. 25%.

Seit den 1970er Jahren übersteigt der Anteil der im tertiären Sektor Beschäftigten den Anteil derer im sekundären Sektor. Seit genau dieser Zeit flacht, wie bereits erwähnt, der Anstieg der Reallöhne ab. Daraus geht die Vermutung hervor, dass die Wertschöpfung im sekundären Sektor größer sein muss als im tertiären. Diese Produktivitätssteigerung durch den technischen Fortschritt beschreibt FOURASTIÉ (s. Fourastié, 1954, S. 27-31).

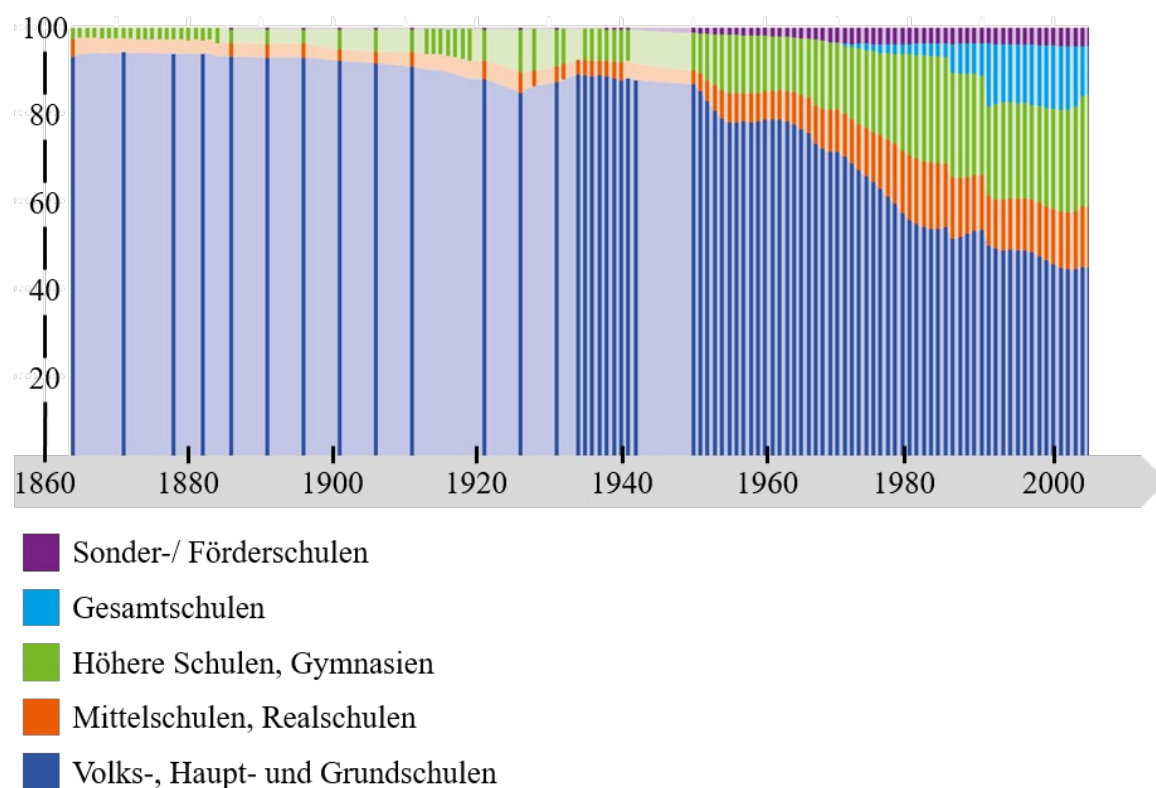


Abb. 2-5: Profil der Schülerinnen und Schüler nach Schularten [%]

Eigene Darstellung in Anlehnung an (vgl. Rahlf, 2015, S. 64)

Die Potentiale der Technik aus der zweiten industriellen Revolution sind ausgereizt, wodurch eine neue, dritte Revolution benötigt wird, um den Wohlstand der deutschen Gesellschaft im gleichen Maße ansteigen zu lassen. Seit den 1990er Jahren ist diese neue Ära durch den Fortschritt der Digitalisierung und Nutzung des Internets im Gange. Benötigt

¹⁷ Die Flächenverteilung und auch die Bevölkerung Deutschlands hat sich im 20. Jahrhundert deutlich gewandelt. Die Betrachtung absoluter Zahlen kann deshalb erhebliche Schwankungen aufweisen und ist vor diesem Hintergrund zu beachten.

dafür wird eine andere Form von Arbeitskräften, wie die Übersicht zum Bildungsgrad der Bevölkerung verdeutlicht (s. Abb. 2-5). Aus der Abbildung geht hervor, dass der Anteil der Schulabgänger mit höherem Bildungsabschluss stetig über die Jahre gestiegen ist. Gemäß der Theorie der nachindustriellen Gesellschaft von BELL bildet die strategische Ressource dieser Revolution das Wissen (vgl. Bell, 1996, S. 219-239). Das spiegelt sich auch in der Entwicklung des Bildungsgrades wieder.

Aus der beispielhaften Darstellung wird klar, dass die Effekte der industriellen Revolution auf die Gesellschaft komplex wie auch vielschichtig sind. Neben den messbaren Größen wie Wohlstand, Beschäftigungsrate und Bildungsgrad, werden ebenfalls nicht-messbare Bereiche der Gesellschaft beeinflusst wie die „*Herausbildung neuer sozialer Klassen, das Aufbrechen altgewohnter sozialer und kultureller Bindungen, die Urbanisierung*“ (Hahn, 2011, S. 2).

Welche sind denn nun die industriellen Revolutionen und anhand welcher Charakteristika unterscheiden sie sich?

RIFKIN hat drei technische Faktoren identifiziert, die jede industrielle Revolution gemein hat:

- Neue Kommunikationswege, um die Wirtschaft zu managen,
- Zugang zu neuen Energiequellen, die die Wirtschaft nutzen kann,
- neue Wege der Mobilität, um die erzeugten Güter zu transportieren.

(vgl. Rifkin, 2016)

In Anlehnung an die von RIFKINS definierten Kriterien, lassen sich bisher drei industrielle Revolutionen identifizieren (s. Tab. 2-1). Anders als in der Politik und auch Literatur kommuniziert wird, ist nach der Abgrenzung des Autors nicht zu erkennen, dass die dritte Revolution bereits abgeschlossen ist. Weitere Wissenschaftler zeigen sich ebenfalls skeptisch gegenüber dem Begriff „Industrie 4.0“. Denn laut JASPERNEITE sind sowohl die Einzelelemente intelligenter technischer Systeme, als auch die Integration von Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) in die Automation, kein Novum. Diese Einzelelemente jedoch miteinander zu einem intelligenten Gesamtsystem zu verknüpfen, stellt eine Neuheit dar (vgl. Jasperneite, 2012, S. 28).

	1. industrielle Revolution	2. industrielle Revolution	3. industrielle Revolution
Jahresangabe	ab ~1780	ab ~1890	ab ~1990
Kommunikationsweg	Telegraphkommunikation, Telegrafie	Radio, Telefon	Internet-basierte Kommunikation, Mobilfunk
Energiequelle	Dampfmaschine für den Fabrikbetrieb, Kohle	Strom aus Kohle (Europa) und Öl (USA), Kernkraft	Erneuerbare Energien
Mobilität	Dampfmaschine für den Schienenbetrieb	Auto, Flugzeug	Vollautomatisiertes, GPS-gestütztes Transportsystem auf Straße, Schiene, Wasser und Luft
Dominante Technologien	Dampfmaschine, mechanischer Webstuhl, Eisenverarbeitung	Elektrizität, Chemie, Verbrennungsmotor, Fließband, Kunststoffe, Elektrik	IKT, Mikroelektronik, cleaner Technology, Biotechnologie, Recycling, nachwachsende Rohstoffe

Tab. 2-1: Identifikationsfaktoren der ersten drei industriellen Revolutionen

Eigene Darstellung in Anlehnung an (vgl. Rifkin, 2016) und (vgl. BMU, 2008, S. 14)

Zu dem Begriff „Industrie 4.0“ lässt sich demnach folgendes Fazit zusammenfassen: Entsprechend der identifizierten Erfüllungskriterien wird die Bezeichnung „Industrie 4.0“ der Definition einer „industriellen Revolution“ nicht gerecht. In diesem Sinne ist sie eher als eine Erweiterung oder „zweite Phase“ der noch andauernden dritten industriellen Revolution zu sehen. Der Begriff hat als Schlagwort jedoch das Potential, um sprachlich ein Vorhaben und Ziel zu differenzieren. Eine Kommunikationsherausforderung entsteht laut VOGEL-HEUSER durch die fehlende einheitliche Definition und die damit einhergehende breite Interpretation des Industrie 4.0-Begriffes (vgl. Vogel-Heuser, 2017). Für das allgemeine Verständnis dieser Arbeit legt das nachfolgende Kapitel die ursprüngliche Begriffsdifferenzierung der deutschen Initiatoren dar.

2.2.3 Begriffsdefinition der Industrie 4.0 für den Rahmen dieser Arbeit

Die anfänglich durch KAGERMANN ET AL. (s. 2.1.1) formulierte Idee zum Begriff „Industrie 4.0“ wurde nachfolgend nicht allgemeingültig definiert. Dieses Versäumnis führte beim breiten Publikum zu einem weiten Spektrum an Interpretationen. Auf die Frage der häufigsten Missverständnisse um die Industrie 4.0 antwortet BIRGIT VOGEL-HEUSER, Mitglied der ACATECH und Lehrstuhlinhaberin für Automatisierungs- und Informationssysteme an der Technischen Universität München: „Viele Menschen denken, dass sie Industrie 4.0 kaufen können. Das ist nicht möglich.“ (Vogel-Heuser, 2017). Damit lässt sich Industrie 4.0 laut BANHOLZER nicht, wie durch den damaligen Bundeswirtschaftsminister Sigmar Gabriel auf der Hannover Messe 2015 kommuniziert, als

Exportgut behandeln (vgl. Banholzer, 2021, S. 82). „Wenn sich mit der Bezeichnung „Industrie 4.0“ keine Technologie, kein Produkt oder keine Dienstleistung beschreiben lässt, so ist davon auszugehen, dass es sich bei „Industrie 4.0“ um ein Konzept bzw. eine Vision der Industrie der Zukunft handelt.“ (Banholzer, 2021, S. 82)¹⁸ (s. a. Vogel-Heuser, 2017).

Der Konsens der Expertenstimmen liegt demnach darin, bei der Verwendung des Industrie 4.0-Begriffes eine detaillierte Einordnung vorzunehmen. Der Inhalt dieser Dissertation folgt der Abgrenzung nach dem „Stufenmodell des Industrie 4.0-Entwicklungspfades“ nach SCHUH ET AL. (vgl. Schuh, Anderl, Dumitrescu, Krüger, & ten Hompel, 2020a, S. 18). Das Stufenmodell kann auf vielzählige Funktionsbereiche eines Industriebetriebes übertragen werden (s. 2.1.2) (vgl. Schuh, Anderl, Dumitrescu, Krüger, & ten Hompel, 2020a, S. 40-47). Diese Arbeit fokussiert den Funktionsbereich der Produktion.

Das Stufenmodell des Industrie 4.0 Entwicklungspfades nach SCHUH ET AL. besteht aus sechs aufeinander aufbauenden Stufen der Digitalisierung und Industrie 4.0 (s. Abb. 2-6). Zur Erreichung einer Reifegradstufe sind konkrete Umsetzungsmaßnahmen zu definieren und systematisch abzuarbeiten. Eine Stufe ist abzuschließen, um die nachfolgende bearbeiten zu können. Der wirtschaftliche Nutzen steigt mit der Erfüllung jeder weiteren Stufe. Die Notwendigkeit dieser logischen Folge verdeutlicht, dass die Digitalisierung die Kernprämisse für die Industrie 4.0 bildet. Die Synonymbildung dieser beiden Begriffe ist demnach unzulässig (vgl. Schuh, Anderl, Dumitrescu, Krüger, & ten Hompel, 2020a).

Den Ausgangspunkt des Stufenmodells bildet gemäß SCHUH ET AL. die Computerisierung (Stufe 1). Das Ziel dieser Stufe ist die Automatisierung repetitiver, manueller Aufgaben. Dies gelingt mittels der Nutzung von Informationstechnik im Betrieb. Die deutsche Industrie ist überwiegend computerisiert, da sie sich durch einen hohen Automatisierungsgrad auszeichnet (vgl. International Federation of Robotics, 2022).

¹⁸ Volker M. Banholzer ist ein Kommunikations- und Medienwissenschaftler, dessen Forschungsschwerpunkt u.a. auf Industrie 4.0 liegt. In seiner Abhandlung befasst er sich tiefgehend mit dem Begriff „Industrie 4.0“ und fasst dort detailliert die verschiedenen Meinungen aus Wissenschaft, Wirtschaft, etc. zusammen.

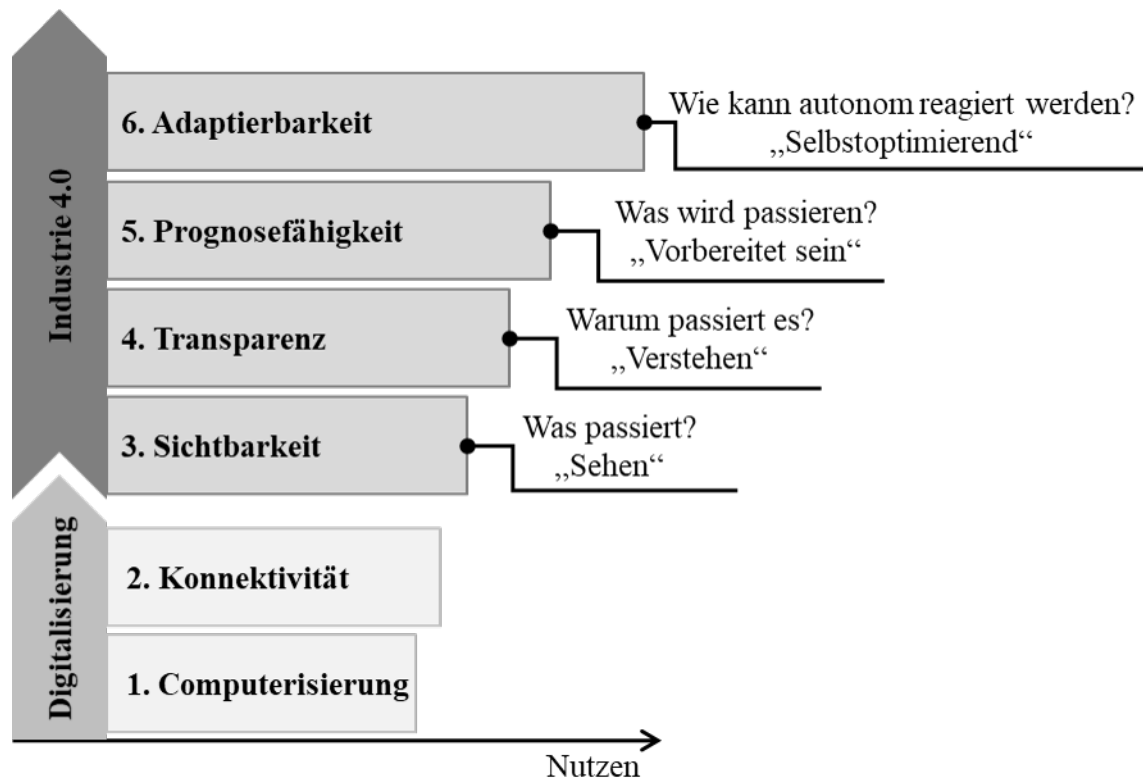


Abb. 2-6: Das Stufenmodell des Industrie 4.0 Entwicklungspfad

Eigene Darstellung in Anlehnung an (vgl. Schuh, Anderl, Dumitrescu, Krüger, & ten Hompel, 2020a, S. 18)

Die nachfolgende Stufe, die ebenfalls der Digitalisierung angehört, ist die Konnektivität (Stufe 2). Allgemein beschrieben ist das Ziel dieser Stufe, Geschäftsprozesse mit der Business-IT zu verbinden. Konkret auf den Bereich der Produktion gefasst, meint die Konnektivität die Verbindung der eingesetzten Informationstechnik der Produktion (Automatisierungstechnik) mit der übergeordneten Business- IT. Es entsteht eine Datenverbindung für die Möglichkeit einer semantisch eindeutigen Datenübertragung.

Die Sichtbarkeit (Stufe 3) dient dem Ziel der Ablösung einer bislang analogen Datenführung hin zur Bildung eines digitalen Abbildes. In den heutzutage realisierten Lösungen können Daten sowohl teilweise analog als auch digital in dezentralen Silos vorliegen. Das führt zu einer lückenhaften Entscheidungsgrundlage, da das Gesamtbild der Daten über ein Produkt nur teilweise und einem kleinen Personenkreis mit unmittelbarem Prozessbezug zur Verfügung stehen. Die Weitergabe der Daten über die Systemgrenzen hinaus in andere Bereiche (wie bspw. der Logistik) scheitert meist an den Systemgrenzen. Mit der Sichtbarkeit soll erreicht werden, dass alle relevanten Daten über einen

Betrachtungsgegenstand¹⁹ entsprechend eines Modells in einer zentralen Datenquelle (Single Source of Truth) verfügbar sind.

Die Transparenz (Stufe 4) beschreibt die Nutzung des zuvor aufgebauten Datenschatzes. Semantische Verknüpfung und Aggregation von Daten zu Information sowie zugehörige kontextuelle Einordnung unterstützen in diesem Schritt die Entscheidungsfindung komplexer Sachzusammenhänge. Es ist möglich, Ursachenanalysen durchzuführen, um die Gründe von auftretenden Prozessereignisse festzustellen. Datenanalysemethoden ermöglichen es, deutlich kompliziertere Zusammenhänge zu untersuchen, als es mit konventionellen analytischen Fähigkeiten eines Menschen möglich wären. An dieser Stelle ist zu betonen, dass die Prozessmitarbeiter mit ihrem Wissen einen besonderen Stellenwert einnehmen und für derartige Analysen eine zentrale Rolle spielen. Die Optimierung der Entscheidungsfindung spiegelt sich in einer verkürzten Reaktionszeit zu einem Ereignis wider (Minimierung von Effekten).

In der Prognosefähigkeit (Stufe 5) werden Zukunftsszenarien simuliert und Eintrittswahrscheinlichkeiten von Ereignissen prognostiziert. Aufbauend auf der Stufe 5 werden die digitalen Abbilder mithilfe einer Langzeiterfassung in die Zukunft projiziert, um unterschiedliche Szenarien abzubilden. Mit der Prognosefähigkeit sind Mitarbeiter der Produktion in der Lage, vorausschauend Maßnahmen einzuleiten, um eintretende Effekte zu verhindern. Eine der Prämissen für eine erfolgreiche Ableitung von Maßnahmen stellt die Güte des zuvor gebildeten digitalen Abbildes dar. Auch hier bilden Prozessmitarbeiter mit ihren Entscheidungskompetenzen einen zentralen Schlüsselfaktor.

Die letzte Stufe des Stufenmodells ist die Adaptierbarkeit (Stufe 6). In diesem Reifegrad erhält das technische System den maximalen Grad der Autonomie, wodurch ein manueller Eingriff durch den Menschen obsolet ist. Das System ist befähigt, sich auf Basis der Datenlage im Falle eines Ereigniseintritts selbst zu modifizieren. Dies Bedarf einer hohen personellen wie auch monetären Investition und ist daher nicht pauschalisiert als optimales Ziel jeder Fabrik zu sehen (vgl. Schuh, Anderl, Dumitrescu, Krüger, & ten Hompel, 2020a, S. 17-21) (vgl. Schuh, Anderl, Dumitrescu, Krüger, & ten Hompel, 2020b, S. 9).

Das Stufenmodell des Industrie 4.0-Entwicklungspfades nach SCHUH ET AL. eignet sich in der industriellen Praxis insbesondere für zwei Punkte. Erstens ermöglicht es, den vorherrschenden Reifegrad eines betrachteten System zu ermitteln. Zweitens kann das Modell für eine klare Definition von Zielen sowie Nicht-Zielen genutzt werden. Damit ist es

¹⁹ Im Bereich der Produktion können das bspw. die herzustellenden Produktinstanzen oder Komponenten der Anlagentechnik sein.

möglich, einen individuellen Meilensteinplan zur Erfüllung des Zieles abzuleiten, wodurch eine interdisziplinäre Zusammenarbeit vereinfacht wird. In Hinblick auf den Funktionsbereich der Produktion zeichnet sich die Industrie durch eine hohe Heterogenität aus, was u.a. auf die Langlebigkeit von Produktionsanlagen zurückzuführen ist. Laut ACATECH fehlt es u.a. konkret an klaren, technischen Umsetzungsschritten sowie an der Überwindung sozialer Hemmnisse, insbesondere zur Herstellung der Konnektivität (Stufe 2) als auch der Sichtbarkeit (Stufe 3). Aus diesem Grund fokussierte die Wissenschaft in den vergangenen Jahren insbesondere die Arbeiten zu bspw. der Verwaltungsschale. Doch diese Arbeiten allein haben nicht zu einem allgemeinen Durchbruch der Industrie 4.0 in der Produktion geführt (vgl. Hirsch-Kreinsen, et al., 2022, S. 11).

Die Anwendung des Reifegradmodells in einer fortfolgenden Studie von SCHUH ET AL. spiegelt jedoch ein anderes Bild wieder. Die Autoren geben an, 80% der Unternehmen, die entsprechend des Stufenmodells eingestuft wurden, hätten die Konnektivität (Stufe 2) abgeschlossen (vgl. Schuh, Anderl, Dumitrescu, Krüger, & ten Hompel, 2020b, S. 11). Eine detaillierte Betrachtung zeigt, dass diese Bewertung über ausgewählte Funktionsbereiche der befragten Unternehmen und im Kontext eines spezifischen Anwendungsfalls getroffen wurde. Die pauschale Nennung eines Durchschnittswertes suggeriert, die Digitalisierung (Computerisierung und Konnektivität) sei in der Mehrheit der befragten Unternehmen gänzlich abgeschlossen. Diese Interpretation der Inhalte verdeutlicht, dass eine derartige Ermittlung des Reifegrads nur im Hinblick auf ein definiertes Zielbild zulässig ist.

Diese Dissertation nutzt das Stufenmodell des Industrie 4.0-Entwicklungspfades als Instrument zur Abgrenzung von Digitalisierung und Industrie 4.0, sowie der näheren Eingrenzung von Handlungsfeldern innerhalb dieser Disziplinen. Ist von Industrie 4.0 die Rede, kann sich dieser Begriff in den vier Facetten von der Sichtbarkeit bis hin zur Adaptierbarkeit darstellen. Es herrschen technische sowie soziale Faktoren vor, die bislang zu Umsetzungshemmnissen von Industrie 4.0 geführt haben. Es besteht ein konkreter Bedarf der Industrie, diese Hemmnisse im Bereich der Produktion zu überwinden, da die Beherrschung immer komplexer werdender Fertigungsprozesse über eine nachhaltige, langfristige Wettbewerbsfähigkeit eines Betriebes am Markt entscheidet. Der Bedarf zur Ausschöpfung der Potentiale, die mit der Industrie 4.0 einhergehen, ist groß. Der Mensch spielt bei der Umsetzung der Industrie 4.0 eine entscheidende Rolle, weshalb dieses Konzept innerhalb dieser Arbeit strikt als sozio-technisches Konzept²⁰ behandelt wird.

²⁰ Gemäß der Empfehlung nach (vgl. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V., 2013).

2.2.4 Internationale Akteure und ihre Initiativen analog der Industrie 4.0

In Kapitel 2.2.3 wurde gezeigt, dass es sich bei der Industrie 4.0 um kein exportierbares Gut im herkömmlichen Sinne handelt, sondern um ein Konzept, welches adaptiert werden kann. Diese Adaption lässt sich in der Literatur anhand von Referenzierungen auf das deutsche Konzept²¹ beobachten. BAHNHOLZER beschreibt, dass aufgrund der standort- und kulturspezifischen Randbedingungen im jeweiligen Kontext nationsabhängige Modifikationen vorzunehmen sind und dadurch unterschiedliche Konnotationen resultieren (vgl. Banholzer, 2021). Dieser Abschnitt zeigt die ähnlichen, aber nicht identischen, internationalen Initiativen auf. Dabei werden die strategischen Ziele relevanter Schlüsselnationen sowie einiger weiterer europäischer Staaten beleuchtet. Eine Zusammenfassung der Erkenntnisse ist in Tab. 2-2 dargestellt.

Nation	Internat. Platz des Automatisierungsgrades	Nationale Initiativen äquivalent der Industrie 4.0	Strategisches Ziel
China	5	Made in China 2025 + weitere	flächendeckende Modernisierung der eigenen Produktion zur Effizienz- und Qualitätssteigerung
Deutschland	4	Plattform Industrie 4.0 + weitere	Erhalt der starken Position in Produktion und Maschinenbau in der digitalen Transformation sowie der Sicherung der hiesigen Arbeitsplätze
Frankreich	20	Nouvelle France Industrielle + weitere	Umgestaltung des französischen Industriemodells durch Digitalisierung durch Optimierung der Wettbewerbsfähigkeit von insbesondere KMUs
Großbritannien	Keine Angabe	High Value Manufacturing Catapult + weitere	Stärkung/ Erhalt des Industriesektors durch Wissenschaftliche Förderung (Reindustrialisierung)
Italien	14	Fabbrica Intelligente + weitere	Investitionen in die hiesige Industrie generieren
Japan	3	Robot Revolution Initiative + weitere	Wertsteigerung von der nationalen Unternehmen
USA	9	Industrial Internet Consortium + weitere	Entwicklung neuer Geschäftsmodelle basierend auf der Industrie 4.0 („Smart Services“)

Tab. 2-2: Ausgewählte internationale Initiativen äquivalent der Industrie 4.0

Eigene Darstellung in Anlehnung an (vgl. Kagermann, Anderl, Gausemeier, Schuh, & Wahlster, 2016) und (vgl. International Federation of Robotics, 2022)

Untersuchungen von WANG ET AL. haben ergeben, dass die Vereinigten Staaten, China und Deutschland die wesentlichen Schlüsselnationen auf den Themengebieten des Smart bzw.

²¹ Oft in der englischsprachigen Literatur als „Industry 4.0“ zu lesen, welches allerdings unzulässig ist, da das deutsche Konzept mit dem Eigennamen „Industrie 4.0“ benannt ist. Die englische Schreibweise ist die Bezeichnung des norwegischen Konzeptes (vgl. Banholzer, 2021).

Intelligent Manufacturing sind, welche laut der Autoren als Äquivalent zum Industrie 4.0-Konzept gesehen werden. Ihr Review der verfügbaren Literatur in Web of Science hat gezeigt, dass diese drei Nationen in Summe 53% der Publikationen verantworten (vgl. Wang, et al., 2021, S. 740).

Deutschland

Im Jahr 2012 ist gemäß WANG ET AL. eine erste Konkretisierung der nationalen Strategie entstanden (vgl. Wang, et al., 2021, S. 750), die von der 2013 gegründeten Plattform Industrie 4.0 führend geleitet wird (s. 2.2.1). Neben dieser Initiative vertreten nach KAGERMANN ET AL. diverse weitere deutsche Wirtschaftsverbände wie der VDA, VDMA, ZVEI, etc. ihre Interessengruppe. Das von Deutschland verfolgte strategische Ziel liegt in dem Erhalt seiner starken Position in Produktion und Maschinenbau, in der digitalen Transformation sowie der Sicherung der hiesigen Arbeitsplätze. Die Fokussierung ihrer Aktivitäten auf den Bereich der Fertigung unterscheidet die deutsche Initiative im Vergleich zu denen der USA und China (vgl. Kagermann, Anderl, Gausemeier, Schuh, & Wahlster, 2016, S. 37, 53). Den Gedanken der Arbeitsplatzsicherung formulierte BANHOLZER vergleichsweise schärfer, indem er beschreibt, im Mittelpunkt der Industrie 4.0 stünde der Effizienz- und Reshoring²²-Gedanke (vgl. Banholzer, 2021, S. 88f). Eine internationale Zusammenfassung von WANG ET AL. interpretiert die deutsche Initiative als Ergänzung des üblichen Maschinen- und Anlagenbaus um informationstechnische Komponenten, um ein Angebot von „value-added service“ bieten zu können (z.B. Sinalytics von Siemens) (vgl. Wang, et al., 2021, S. 751). Gemäß KAGERMANN ET AL.²³ wird die Plattform Industrie 4.0 global als ein strategisch attraktiver Kooperationspartner gesehen (vgl. Kagermann, Anderl, Gausemeier, Schuh, & Wahlster, 2016, S. 64). Diese Hypothese wird durch die geschlossenen Kooperationsverträge mit anderen Initiativen großer Industrienationen wie bspw. USA und China untermauert (vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, kein Datum) (vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2016).

Vereinigte Staaten von Amerika (USA)

Bedeutende Industrie 4.0-äquivalente Initiativen in den USA sind laut KAGERMANN ET AL.: Industrial Internet Consortium (IIC), Smart Manufacturing Leadership Coalition (SMLC), AllSeen Alliance, Open Connectivity Foundation (OCF), National Network for Manufacturing Innovation (NNMI). Strategisch verfolgen die amerikanischen Initiativen das

²² Reshoring bezeichnet den Vorgang eines Unternehmens seine ursprünglich ins Ausland verlagerte Funktionen zurück ins Ursprungsland zu holen (vgl. Heim, Matiz, & Ehrat, 2014).

²³ Bei den Autoren handelt es sich um Mitglieder der Acatech, welche den Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0 bilden.

Ziel der Entwicklung neuer Geschäftsmodelle („Smart Services“) basierend auf der Industrie 4.0 (vgl. Kagermann, Anderl, Gausemeier, Schuh, & Wahlster, 2016, S. 53). Ihr Schwerpunkt liegt daher überwiegend auf den IT-Aspekten wie bspw. dem Cloud Computing, Deep Learning oder Virtual Reality (vgl. Wang, et al., 2021, S. 750). Im Vergleich zu der Plattform Industrie 4.0 ist der Wirkungsbereich des IIC deutlich breiter gefasst, indem neben der Fertigung ebenfalls Energie, Gesundheitswesen, öffentlicher Sektor und Transport adressiert werden (vgl. Kagermann, Anderl, Gausemeier, Schuh, & Wahlster, 2016, S. 53).

China

China veröffentlichte im Jahr 2015, in der Gegenüberstellung zu Deutschland und den USA, vergleichsweise spät eine nationale Strategie (vgl. Wang, et al., 2021, S. 751). Bedeutende chinesische Industrie 4.0-äquivalente Initiativen sind laut KAGERMANN ET AL.: Made in China 2025, Internet of Things Center Shanghai, Internet Plus, Smart Factory 1.0 Initiative. Der Hintergrund der chinesischen Strategie liegt in ihrer aktuellen Stellung auf dem Weltmarkt. In der chinesische Industrie dominiert aktuell die kostengünstige Massenproduktion. Es existieren nur wenige Großkonzerne (wie bspw. Huawei), die über fortschrittliche, hochautomatisierte Fabriken verfügen. Ihre Industrie ist überwiegend von KMUs geprägt, die nicht einmal digitalisiert sind. Entsprechend des Stufenmodells des Industrie 4.0-Entwicklungspfades (s. Abb. 2-6) befindet sich der Reifegrad der chinesischen Fertigungsindustrie deutlich unter dem Schnitt der führenden Industrienationen. Vor dem Hintergrund dieser Disparitäten ist das strategische Ziel der chinesischen Initiativen die flächendeckende Modernisierung der eigenen Produktion zur Effizienz- und Qualitätssteigerung, da die kostengünstige Massenproduktion nicht mehr als zukunftsfähig angesehen wird (vgl. Kagermann, Anderl, Gausemeier, Schuh, & Wahlster, 2016, S. 40f).

Wie an den Beispielen von Deutschland, China und den USA gezeigt, lassen sich diverse internationale Initiativen erkennen (s. Abb. 2-7). Die strategischen Ziele hängen grundsätzlich mit den konkreten Herausforderungen zusammen, vor denen die Nationen individuell stehen. Gemäß WANG ET AL. steht Japan vor der Herausforderung des demographischen Wandels, daher ist das japanische Ziel eine Wertsteigerung von Unternehmen durch die Fokussierung des Lean Managements (vgl. Wang, et al., 2021, S. 751). Buhr et al. fassen zusammen, dass in Großbritannien die traditionelle, verarbeitende Industrie einen erheblichen Bedeutungsverlust erlitten hat. Das britische Ziel ist daher die Reindustrialisierung, also die Stärkung und der Erhalt bestehender Industriezweige, und nicht die Digitalisierung der Industrie selbst. Das französische Ziel ist die Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit von KMUs durch die Aneignung und Integration digitaler Anwendungen in die Produktion, da die französische Industrie in den vergangenen Jahren

mit einer tiefgreifenden Wettbewerbskrise zu kämpfen hatte. Italiens Strategie zielt auf die Generierung von Investitionen in die nationale Industrie ab, die aktuell von einem regionalen Ungleichgewicht geprägt ist (vgl. Buhr & Stehnen, 2018, S. 18-20).

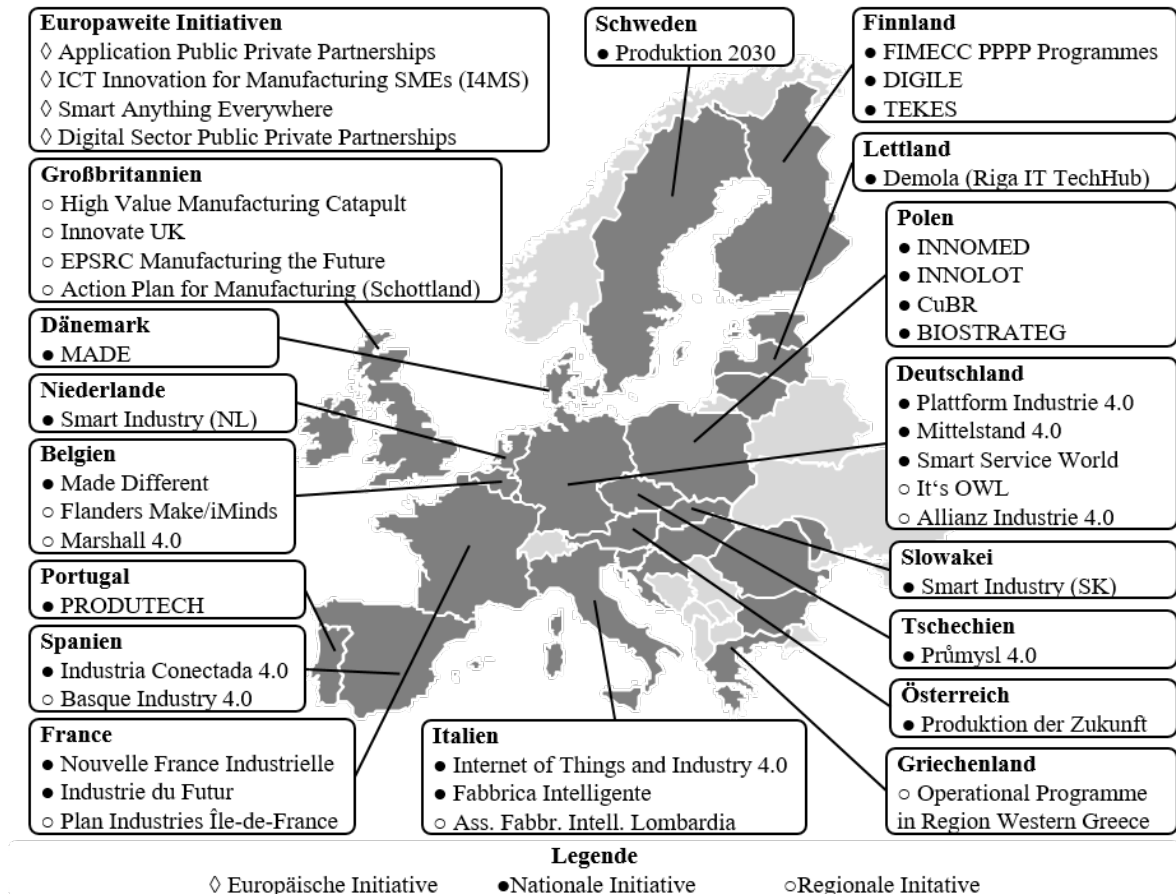


Abb. 2-7: Übersicht über europäische Initiativen zur Digitalisierung der Industrie und Initiativen analog der Industrie 4.0

Eigene Darstellung in Anlehnung an (vgl. Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology, 2016)

2.3 Beherrschung der Produktionsprozesskomplexität mithilfe des Informationsmanagement

Die Beherrschung der Produktionsprozesskomplexität hängt sowohl von der individuellen Problemlösungsfähigkeit der Mitarbeiter als auch den bereitstehenden Informationen ab. Dieses Kapitel führt die Begriffe „Daten, Informationen und Wissen“ anhand der Wissenstreppe ein. Weitergehend wird beschreiben, wie die konventionelle Wissensweitergabe in Unternehmen verläuft und wie die Informationsbereitstellung durch die Nutzung der Verwaltungsschale abgesichert werden kann.

2.3.1 Wissenstreppe

Im alltäglichen Sprachgebrauch werden die Begriffe „Daten“, „Informationen“ und „Wissen“ gerne als Synonyme füreinander verwendet. Doch insbesondere im Kontext der Industrie 4.0 ist es wichtig, die tatsächliche Bedeutung dieser Begriffe zu kennen, um Ziele sprachlich klar zu differenzieren. Diese Grundbegriffe werden im Folgenden anhand der Wissenstreppe nach NORTH unter der Verwendung Abb. 2-8 eingeführt.

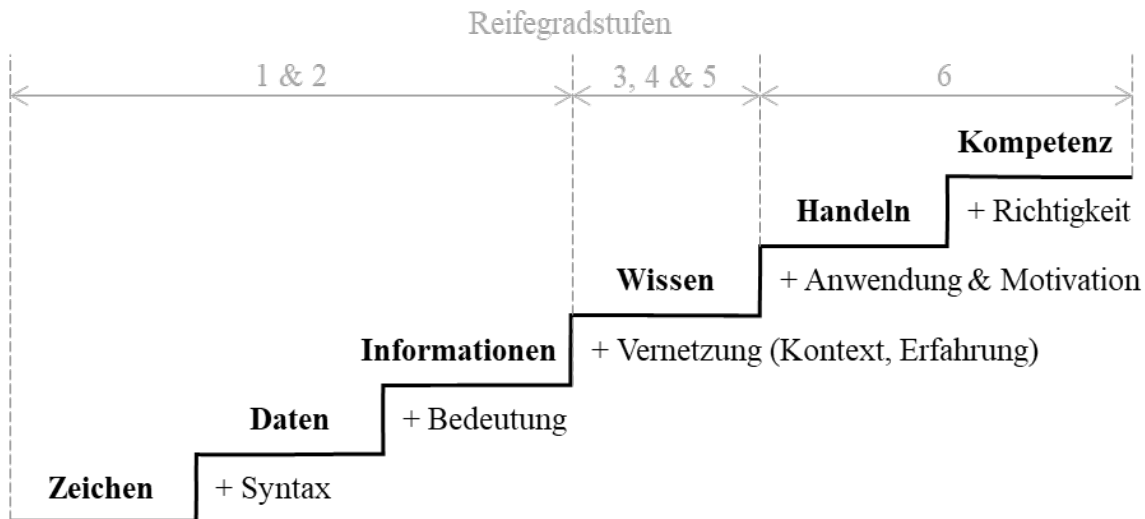


Abb. 2-8: Ergänzung der Wissenstreppe um die Reifegradstufen der Industrie 4.0

Eigene Darstellung in Anlehnung an (vgl. Lüder, Steininger, & Goltz, 2023)

Gemäß der Definition von NORTH beginnt die Wissenstreppe mit den Zeichen. Zeichen sind einzelne Buchstaben, Ziffern oder Sonderzeichen, welche durch Ordnungsregeln (Syntax) zu Daten werden. Daten entstehen durch die Bildung einer beliebigen Zeichenfolge. Erst durch den Bezug auf einen Bedeutungskontext werden aus Daten Informationen (Semantik), welche als Entscheidungsgrundlage dienen. Informationen sind jedoch nur hilfreich, wenn diese mit aktuellen oder vergangenen Informationen vernetzt und in Relation zu einem Gesamtbild gesetzt werden können. Diese Gesamtheit wird Wissen genannt. Wissen ist grundsätzlich kontextspezifisch und an Personen gebunden, da dieses entsprechend der individuellen Erfahrungen geprägt ist. NORTH definiert „*Wissen als die Gesamtheit der Kenntnisse und Fähigkeiten, die Personen zur Lösung von Problemen einsetzen. Dies umfasst sowohl theoretische Erkenntnisse als auch praktische Alltagsregeln und Handlungsanweisungen. Wissen stützt sich auf Daten und Informationen, ist im Gegensatz zu diesen jedoch immer an Personen gebunden. Wissen entsteht als individueller Prozess in einem spezifischen Kontext und manifestiert sich in Handlungen*“ (North, 2021, S. 38). Das Anwenden von Wissen wird als Handeln bezeichnet, während sich die Kompetenz noch durch die Richtigkeit des Handelns abhebt (vgl. North, 2021, S. 37-39).

Ist in Bezug auf einen Produktionsprozess also nicht klar, wie bei einem konkreten Ereignis zu handeln ist, fehlt das entsprechende Wissen dazu. Fehlendes Wissen wird als Wissenslücke bezeichnet. Wissenslücken erzeugen einen konkreten Informationsbedarf, der zuerst befriedigt werden muss, um wiederum handlungsfähig zu werden.

LÜDER ET AL. haben die Wissenstreppe nach NORTH mit dem Stufenmodell des Industrie 4.0-Entwicklungspfades übereinandergelegt. So wird klar, dass die beiden Stufen der Digitalisierung (Computerisierung und Konnektivität) zur Bereitstellung von Daten und Informationen dienen. Diese Bereitstellung wird in der Industrie 4.0 genutzt, um den Wissensschatz anzureichern. Das Handeln und die Kompetenz werden erst mit der Stufe der Adaptierbarkeit erreicht (vgl. Lüder, Steininger, & Goltz, 2023).

2.3.2 Determinanten der Problemlösungsfähigkeit

Die Intelligenz eines Menschen gilt als Haupteinflussfaktor seiner individuellen Problemlösungsfähigkeit. DÖRNER zeigt auf, dass dies nur bedingt zutrifft. Denn neben den Faktoren des Gedächtnisses, welches sich noch in das Wissen über den spezifischen Betrachtungsgegenstand als auch die allgemeine Erfahrung aufteilt, nehmen auch nicht konkretisierbare Faktoren, wie Emotionen und Motivation, Einfluss auf die Problemlösungsfähigkeit eines Individuums. Der folgende Abschnitt zeigt einen kleinen, ausgewählten Ausschnitt der Gedächtnisforschung, um den Mythos der Intelligenz als alleinigen Faktor bezüglich der individuellen Problemlösungsfähigkeit abzuschwächen. Es ist nicht das Ziel, die Komplexität des menschlichen Gedächtnisses in Gänze wieder zu spiegeln.

Nach DÖRNER hängt die individuelle Problemlösefähigkeit an intellektuellen und außerintellektuellen Determinanten. Die intellektuellen Determinanten bilden das stationäre Wissen und das potentielle Wissen, die außerintellektuellen Determinanten bilden die Motivation und Emotion (vgl. Dörner, 1984) (s. Abb. 2-9).

Das stationäre Wissen ist das vorhandene Wissen zu einem konkreten Sachverhalt. Der Ausbau dieses Wissens erfolgt über den individuellen Lernprozess eines Menschen (s. Abb. 2-10).

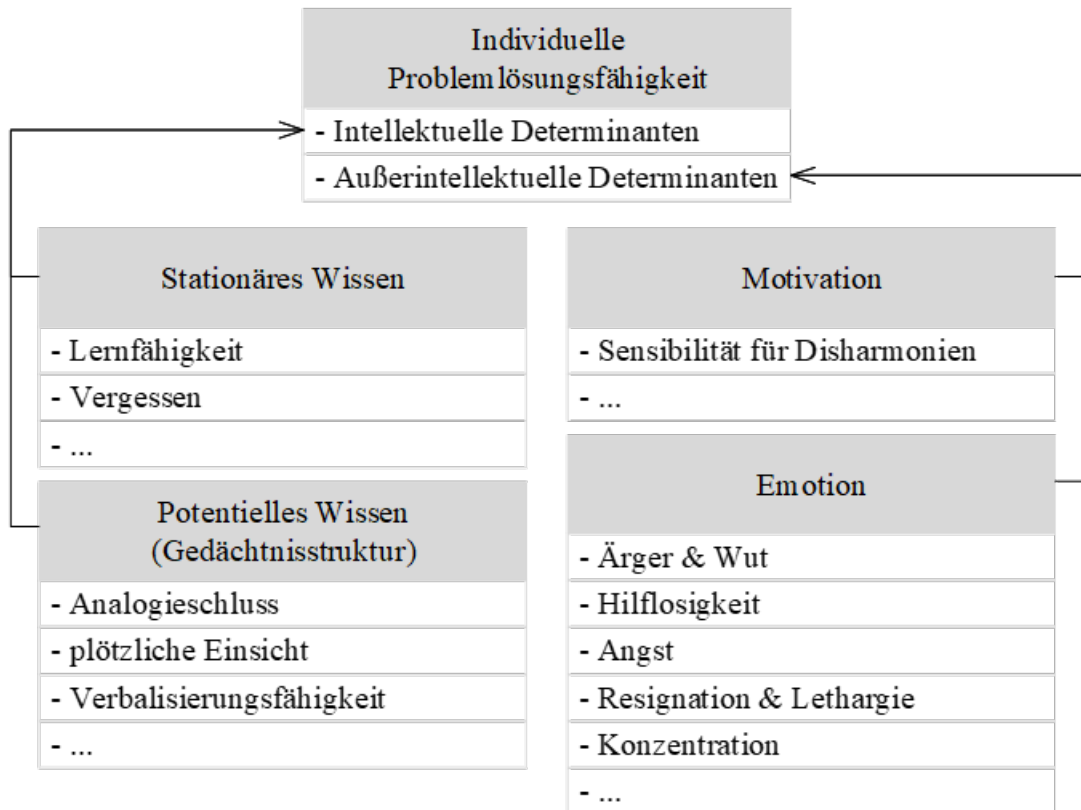


Abb. 2-9: Determinanten der individuellen Problemlösungsfähigkeit

Eigene Darstellung auf Basis von (vgl. Dörner, 1984)

Das individuelle, stationäre Wissen wird durch das Erkennen prozessualer Kausalzusammenhänge aufgebaut. Unter idealen Bedingungen, wenn sich der Mensch kontinuierlich mit einem Thema beschäftigt, verläuft die menschliche Lernkurve zunehmend flach ansteigend. In der Realität wird die Lernkurve von der Vergessenskurve nach EBBINGHAUS überlagert, sobald der Lernprozess unterbrochen wird (vgl. Ebbinghaus, 1885). Das Vergessen hat den Rückgang des Wissens zur Folge. Erlerntes Wissen nimmt im Laufe der Zeit wieder ab. Bei Wiederaufnahme des Lernprozesses wird auf einem niedrigeren Wissenstand aufgesetzt. Tatsächlich verläuft die reale Lernkurve in einer Kombination aus der idealen Lern- sowie Vergessenskurve (vgl. Oswald, 2008). Das stationäre Wissen eines Prozessexperten und damit die Beherrschbarkeit eines Prozesses hängt demnach u.a. von der Komplexität des Sachverhaltes und der investierten Lernzeit ab.

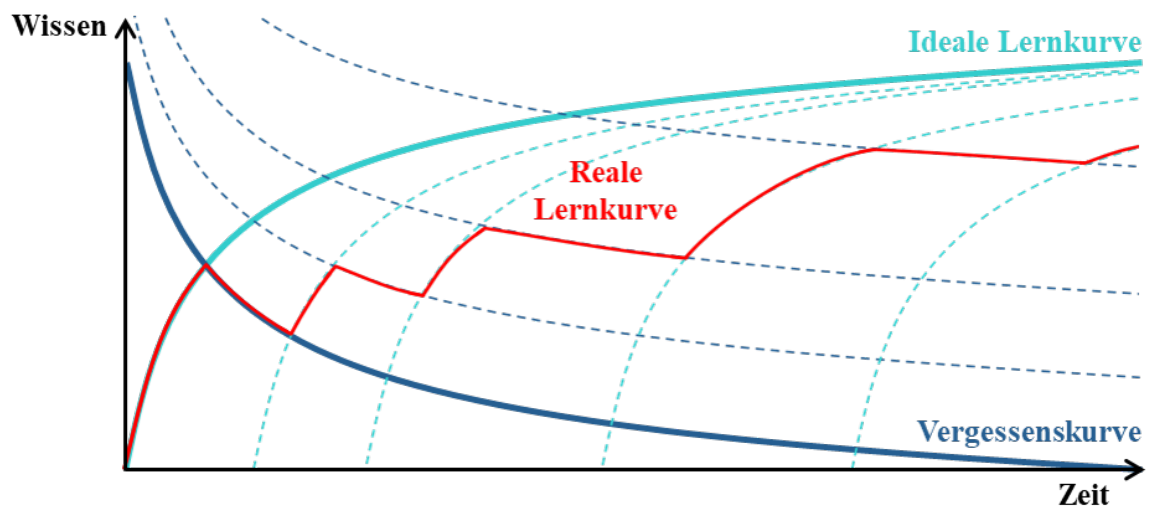


Abb. 2-10: Die menschliche Lernkurve

Eigene Darstellung in Anlehnung an (vgl. Oswald, 2008, S. 50)

Die individuelle Problemlösungsfähigkeit hängt laut DÖRNER neben den stationären auch vom potentiellen Wissen ab. Das potentielle Wissen ist implizit im Langzeitgedächtnis vorhanden und kann über entsprechende kognitive Operationen nutzbar gemacht werden. Eine dieser Operationen ist der Analogieschluss, also die Übertragung bekannter Sachzusammenhänge auf einen neuen Kontext. Das setzt eine Abstraktionsfähigkeit voraus. Ein weiteres Beispiel einer kognitiven Operation ist die „plötzliche Einsicht“. Dieses Phänomen beschreibt den Vorgang, wenn ein Problem nicht ad hoc gelöst werden kann, nach einer gewissen Ruhezeit und Distanz zur Thematik (Inkubationszeit) die Lösung vermeintlich spontan auf der Hand liegt. Die Verbalisierung, ebenfalls eine kognitive Operation, bildet ein Element für die Übersetzung eines gelernten Sachverhaltes in das Langzeitgedächtnis. Neben den kognitiven Fähigkeiten eines Menschen stellen die außerintellektuellen Determinanten Motivation und Emotion weitere Faktoren dar, die laut DÖRNER ein ebenso großen Einfluss auf die individuelle Problemlösungsfähigkeit haben (vgl. Dörner, 1984).

Das Ziel der Industrie 4.0 ist es, die in Abb. 2-10 gezeigte reale Lernkurve zu unterstützen, indem prozessrelevante Informationen für jeden zugänglich gemacht werden. Diese Technisierung der Prozessinformationen kann mehrere Vorteile bieten. Unternehmen profitieren davon, indem relevante Prozessinformationen kollektiv für ihre Mitarbeiter verfügbar sind. Insbesondere neue Mitarbeiter profitieren von der Verfügbarkeit dieser Informationen, um bei ihrer Einarbeitung unterstützt zu werden. Durch die spezifische Auswahl und konstante Anreicherung der Informationen kann der Verlust an Prozesswissen durch Personalwechsel verringert werden. Greifen alle Prozessmitarbeiter auf dieselben Informationen zu, werden diese in die Lage versetzt, ähnliche Handlungsaktivitäten zur

Prozessstabilisierung abzuleiten. Für die Prozessmitarbeiter selbst ergibt sich der Vorteil, dass sie eine steilere Lernkurve durchlaufen und selten auftretende Ereignisse mit dieser technische Unterstützung nicht vergessen. Dies ermöglicht den Prozessmitarbeitern eine Verkürzung ihrer Reaktionszeit, sodass sie in ihrer Arbeitszeit wertschöpfenderen Tätigkeiten, wie bspw. der Ermittlung neuer Informationsbedarfe, nachgehen können. Psychologisch gesehen, erfahren sie eine Entlastung, da der Druck mit voranschreitender Zeit eines Produktionsstillstandes im Industriebetrieb enorm wird. Die Anforderungen an die Lösung zur Technisierung der Prozessinformationen besteht darin, dass diese leicht verständlich, verfügbar und modifizierbar ist, damit sie von den Prozessmitarbeitern akzeptiert und angewandt wird.

2.3.3 Wissensweitergabe in Unternehmen

Allgemein gefasst, befasst sich das Wissensmanagement in Unternehmen mit der Verwaltung von Wissensressourcen, um den Zugang und Wiederverwendung des Wissens zu erleichtern (vgl. O'Leary, 1998).

Das grundsätzliche Ziel des Wissensmanagements ist aus individuellem Wissen ein kollektives, personenungebundenes Wissen zu generieren (s. Tab. 2-3). Wissen entsteht, indem Informationen mit vorhandenem Vorwissen gepaart werden. Im Kontext der Produktion können Prozessmitarbeiter dieses Wissen in ihre persönliche Handlungsweise übernehmen. Jedes Individuum entwickelt also sein individuelles Wissen. Die kollektive Bereitstellung von personenungebundenem Wissen widerspricht dem ersten Anschein nach der Definition von Wissen von NORTH (s. 2.3.1), dort heißt es, Wissen sei strikt personengebunden (vgl. North, 2021, S. 38). Doch im Wissensmanagement wird anhand der zwei wesentlichen Wissensarten (explizit und implizit) unterschieden, ob Wissen in verschiedenen Formen von Information individuell oder kollektiv bereitgestellt werden kann. Diese Unterscheidung bezieht sich demnach allein auf die Fähigkeit zur Informationsbereitstellung. Die Bezeichnung explizites Wissen drückt aus, dass dieses formal und systematisch weitergegeben werden kann. Durch das Bereitstellen des individuellen Wissens für ein Unternehmen (bspw. in Form von Verfahrensrichtlinien) wird dieses zu einem kollektiven Wissen, welches also für jeden Mitarbeiter zugänglich wird. Im Gegensatz dazu charakterisiert sich implizites Wissen durch Inhärenz²⁴ (entspricht der Definition nach NORTH) und ist nicht konkret artikulierbar. Durch implizite Wissensträger entsteht für Unternehmen eine Gesamtheit aus Prozessexperten, die einen hohen Stellenwert

²⁴ Inhärente Merkmale sind Merkmale, die einem Objekt innewohnen, also ohne diesem sie nicht für sich alleine bestehen können (Inhärenz, kein Datum).

innerhalb eines Unternehmens besitzen. Gleichzeitig besteht für Unternehmen der Nachteil, dass durch das Ausscheiden dieser Wissensträger das implizite Wissen verloren geht (vgl. Lam, 2000).

Ontologische Dimension			
	Individuelles Wissen	Kollektives Wissen	
Epistemologische Dimension	Explizites Wissen	„embrained knowledge“ Bewusste, verbalisierte Fähigkeiten und Kompetenzen	„encoded knowledge“ In Regeln. „Verfahrensrichtlinien“ kristallisiertes Wissen
	Implizites Wissen	„embodied knowledge“ Verinnerlichtes Können	„embedded knowledge“ In organisationalen Routinen und „mental Modellen“ verankertes Wissen

Tab. 2-3: Individuelle und kollektive, organisatorisches Wissensarten

(Frost, 2018) aus (Lam, 2000)

Die Übertragung des Wissens innerhalb einer Organisation haben NONAKA ET AL. in dem SECI-Modell (Socialization, Externalization, Combination, Internalization) beschrieben (s. Abb. 2-11). Der erste Schritt zur Wissensübertragung erfolgt über die Sozialisierung (engl. „Socialization“), also die Übertragung von „implizit zu implizit“ bspw. in Form von Integration eines neuen Team-Mitgliedes in den betrieblichen Arbeitsalltag. Das Anlernen erfolgt in Form von Beobachtungs- und Nachahmungstechniken. In der Externalisierung (engl. „Externalization“) wird mithilfe von Analogien und Metaphern implizites in explizites Wissen umgewandelt und auf diese Weise zugänglich gemacht. Dies erfordert eine intensive Kommunikation. Herkömmliche Informationstechnologien umfassen üblicherweise die „Kombination“ (engl. „Combination“) von unterschiedlichen expliziten Wissensquellen, da hierzu die formalisierten Wissensquellen referenziert werden können. In der „Internalisierung“ (engl. „Internalization“) wird das explizite Wissen in organisationalen Routinen verankert und wird somit wieder zu implizitem Wissen, sodass Individuen komplexe Tätigkeiten intuitiv erfüllen (vgl. Nonaka & Takeuchi, 1997, S. 84-87). Im alltäglichen Ablauf wird diese Wissensspirale nach Nonaka et al. üblicherweise mehrfach durchlaufen, um die Wissensstufe der Kompetenz zu erreichen. Aufgrund der beliebig vielen Iterationen kann die Wissensspirale auch als Wissenshelix angesehen werden.

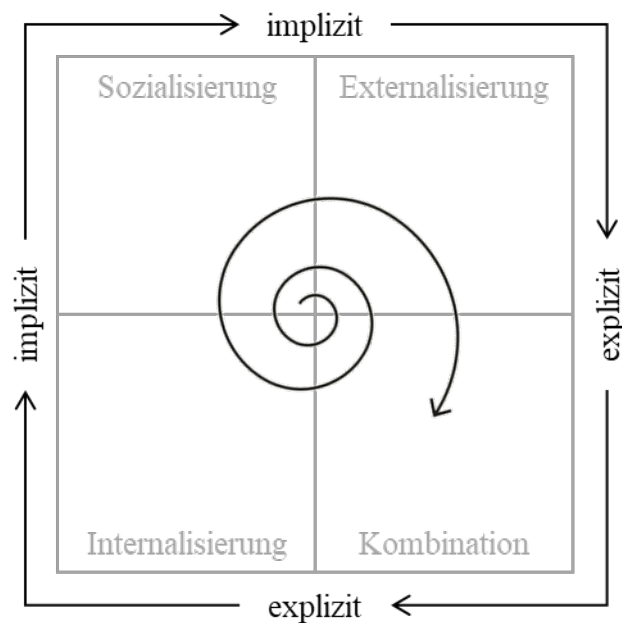


Abb. 2-11: Wissensspirale

Eigene Darstellung in Anlehnung an (vgl. Nonaka & Takeuchi, 1997, S. 84)

Die Industrie 4.0 in Verbindung mit der Konnektivität erweitert nun das Spektrum der verfügbaren Datenquellen, aus deren Anbindung an IT-Infrastrukturen mithilfe von Prozessexperten neue Informationen gewonnen werden können, wodurch das kollektive Prozesswissen erweitert werden kann. Von hoher Relevanz ist hierbei, den mit Wissenslücken gleichzusetzenden expliziten Informationsbedarf zu identifizieren. Dieser Informationsbedarf kann sich über ein Spektrum von allgemeinen bis hin zu sehr spezifischen Fragestellungen erstrecken. In dem Fazit von NOWACKI ET AL. ist ersichtlich, dass ein wesentlicher Erfolgsfaktor bei der Umsetzung von Industrie 4.0 in der Praxis ein gemeinsames Verständnis über den Betrachtungsgegenstand, die fachlichen Herausforderungen und einen Wissenstransfer innerhalb interdisziplinärer Arbeitsgruppen ist (vgl. Nowacki, Ritter, Lüder, & Behnert, 2021). Damit umfasst der Wirkungsbereich der Industrie 4.0 zum einen die Kombination des aus verschiedenen Informationsquellen gewonnenen Wissens, zum anderen die Externalisierung von Wissen, durch die Erfassung des impliziten Wissens.

2.3.4 Verwaltungsschale als Informationsträger der Industrie 4.0-Komponente

Die Prämisse einer datenbasierten Informationsgewinnung ist eine einheitliche Datenmodellierung. Für den Betrachtungsgegenstand der Produktionssysteme wurde das Konzept der Industrie 4.0-Komponente und ihrer Verwaltungsschale entwickelt und in der DIN SPEC 91345:2016-04 niedergeschrieben. Sie schafft einen Handlungsrahmen für die

identifizieren. Der Körper beinhaltet die definierten Merkmale des Assets (vgl. DIN SPEC 91345:2016-04, S. 22). Grundsätzlich kann das Modell der Verwaltungsschale aus einer Kombination mehrerer domänen- oder kontextspezifischer Teilmodelle bestehen. Diese können sich bspw. zwischen den verschiedenen Funktionsbereichen eines Industriebetriebes unterscheiden (s. 2.1.2). Die Klassifikation der Merkmale erfolgt über die Einteilung in Basis-, Pflicht-, Optionale oder Freie Merkmale (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2020, S. 31). Die PLATTFORM INDUSTRIE 4.0 zeigt anhand mehrerer konkreter Beispiele, wie die Verwaltungsschale in der Praxis umgesetzt werden kann (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2020).

2.4 Sozio-technische Produktionssysteme in Industriebetriebe

Zur Vereinfachung der Modellierung werden Produktionssysteme häufig als rein technische Systeme dargestellt. Diese Betrachtungsweise kann im Rahmen der datenbasierten Informationsbereitstellung zu verschiedenen Herausforderungen bei der Umsetzung von Industrie 4.0 führen. Dieses Kapitel leitet her, warum es sich bei Produktionssystemen in Industriebetrieben heutzutage noch immer um sozio-technische Systeme handelt.

2.4.1 Die Phasen des Produktlebenszyklus

Die Abb. 2-13 zeigt den Ausschnitt des Produktlebenszyklus, welcher für diese Arbeit relevant ist. Allen voran stehen die Planungsphasen. Die Produktentwicklung erfolgt mithilfe des Entwurfes und Konstruktion des Produkttypen unter der Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen. Bei der Konstruktion werden zuzüglich der Soll-Maße auch zulässige Toleranzbereiche angegeben. Die Angabe von Toleranzen stellt ein Gleichgewicht zwischen der Gewährleistung der Produktfunktionalität bei Nutzung und der Produktionsgenauigkeit her. Je kleiner die Toleranzen, desto höher ist der Anspruch an die Produktionsgüte, welche zu höheren Kosten der Produktionsanlagen führen. Die Produktionsentwicklung befasst sich mit der Planung des Produktionsprozesses, der für die Produktrealisierung benötigt wird. Das beinhaltet neben der Auslegung der mechanischen, elektrischen sowie informationstechnischen Komponenten auch weitere Tätigkeiten wie die Arbeits- und Prüfplanung. Die Realisierungsphase umfasst die tatsächliche Produktion von Produktinstanzen. Die Gesamteffizienz einer Produktionsanlage ist von ihrer Lauffähigkeit abhängig, die bspw. durch die Werkzeugverwaltung, Lagersteuerung, Instandhaltung und Qualitätssteuerung gewährleistet wird (vgl. Vajna, et al., 2018, S. 27) (vgl. Scheer, 1995, S. 87).

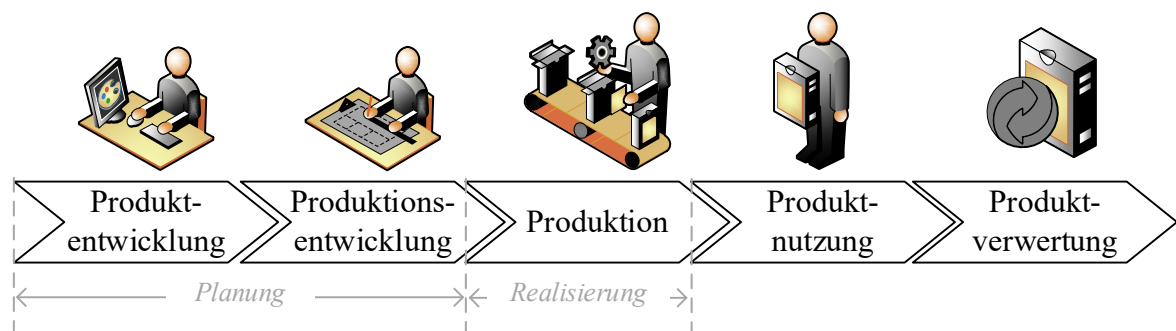


Abb. 2-13: Produktlebenszyklus

Eigene Darstellung in Anlehnung an (vgl. Vajna, et al., 2018, S. 27)

Der etymologische Ursprung des Wortes „Qualität“ liegt im Lateinischen (lt.) „qualitas“ und beschreibt im handelssprachlichen Sinne die zufriedenstellende Ausführung eines Warenzustandes, abgeleitet von lt. „qualis“ (Wie beschaffen? Von welcher Art?) (vgl. Pfeifer, 1993). Die Definition des Begriffes „Qualität“ lautet in der Richtlinie zum Qualitätsmanagement wie folgt „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale [...] eines Objektes [...] Anforderungen [...] erfüllt“²⁵ (DIN EN IEC 9000:2015-11, S. 39). Anforderungen stellen in diesem Zusammenhang eine festgelegte und verpflichtende Erfordernis oder Erwartung dar, welche vorausgesetzt wird. Merkmale stellen Qualitätsmerkmale dar, welche diese Anforderungen erfüllen müssen²⁶. Das Objekt ist im Kontext des vorab beschriebenen Produktlebenszyklus das Ergebnis des Produktionsprozesses, also das Produkt. Die Qualitätssteuerung wird als diejenige Aktivität beschrieben, die auf die Erfüllung der Qualitätsanforderungen gerichtet ist (vgl. DIN EN IEC 9000:2015-11, S. 31).

Die Sicherung der Produktqualität ist von hoher Bedeutung. Eine Auslieferung von Produktion mit schlechter Qualität führt zu unzufriedenen Kunden. Die Folge sind Reklamationen, ein möglicher Imageschaden, ein Wechsel der Kunden zur Konkurrenz bis hin zu rechtlichen Konsequenzen und Strafzahlungen. Das Fehlen von Qualität erzeugt demnach Kosten. Parallel führt die Prüfung von Qualität ebenfalls zu Kosten (bspw. Wareneingangsprüfung und Produktprüfung) (vgl. Jakoby, 2019, S. 16f). Die Sicherung Produktqualität ist daher eine Motivation der Datennutzung.

²⁵ Für die Definition von „Inhärenz“ (s. 2.3.3).

²⁶ Die Festlegung dieser Qualitätsziele sind ein Teil der Qualitätsplanung (vgl. DIN EN IEC 9000:2015-11).

2.4.2 Bezug der Systemtheorie auf Produktionssysteme

In der Literatur stößt man auf diverse, sich jedoch sehr ähnelnde Definitionen des Systembegriffes (s. a. Ropohl, 2009). Im Kern beschreiben die Quellen folgende Charakteristika nach VDI 3633:2018-05, die ein System auszeichnen:

- Ein System weist einen Zustand auf, der sich verändern kann.
- Es besteht aus mehr als einem Element (auch Subsysteme oder Teilsysteme genannt)²⁷
- Diese Elemente sind miteinander verknüpft. In Abhängigkeit der Kausalbeziehungen und der Veränderlichkeit, kann ein Systemaufbau einfach, kompliziert oder komplex sein.
- Ein System lässt sich gegen seine Systemumwelt (auch Umwelt oder seltener Supersystem genannt) mittels einer Systemgrenze abgrenzen. Das Umweltverhältnis kann offen oder geschlossen sein.
- Es wirkt auf einen Input ein, sodass ein modifizierter Output entsteht. Das Systemverhalten kann deterministisch oder stochastisch sein (es gibt noch weitere Kategorien, auf die hier aber nicht weiter eingegangen werden).

(vgl. VDI 3633:2018-05, S. 33)

Aus wirtschaftlicher Sicht stellt sich in Bezug auf Produktionssysteme die Frage, wie die Qualitätsanforderungen an Produkte zuverlässig wiederholbar erreicht werden können. Denn je mehr Produkte entstehen, welche die definierten Qualitätsanforderungen erfüllen, desto höher ist die Effizienz²⁸ des Produktionssystems und somit Gewinnspanne des Unternehmens. Aus Sicht der Systemmodellierung bedeutet das, dass ein hinreichend genaues Modell benötigt wird, um alle relevanten Systemelemente und ihre Wechselwirkungen zu erfassen. Oftmals wird in der Literatur auch eine Teilmodellierung akzeptiert. Das kann eine unzureichende Lösungsentwicklung zur Folge haben, wie auch im Kontext der Industrie 4.0 zu beobachten ist. Das Versäumnis der ganzheitlichen Modellierung wird im folgenden Abschnitt aufgearbeitet.

ULRICH ET AL. zeigen, dass Systeme sich grundsätzlich in den drei Klassen ökologische, soziale und technisch Systeme voneinander abgrenzen lassen (s. Abb. 2-14). Die Autoren begründen diese Unterteilung auf Basis der kybernetischen Perspektive (Sinnebene:

²⁷ In dieser Arbeit „Element“ genannt.

²⁸ „Verhältnis zwischen dem erreichten Ergebnis und den eingesetzten Ressourcen“ (DIN EN IEC 9000:2015-11, S. 46)

Welchen Sinn hat es? Funktionale Ebene: Wie funktioniert es? Materielle Ebene: Woraus besteht es?). Soziale Systeme werden als Sonderform der ökologischen angesehen, da diese nicht nur den Zweck der Selbsterhaltung, sondern höhere gesellschaftliche Zwecke erfüllen. Technische Systeme hingegen sind künstlich geschaffen, um einen vom Menschen definierten Zweck zu erfüllen (vgl. Ulrich & Probst, 1991, S. 98).

		Systemische Perspektive		
		Systemarten	Ökosysteme	Soziale Systeme
Kybernetische Perspektive	Problemebenen			
	Sinnebene Welchen Sinn hat es?	Natürlicher Selbstwert	Veränderliche gesellschaftliche Zwecke	Spezifische menschliche Ansichten
	Funktionale Ebene Wie funktioniert es?	Natürliche Wirkungskreisläufe	Gestaltbare Kreisläufe menschlichen Zusammenwirkens	Zielgerichtete konstruierte Mechanismen
	Materielle Ebene Woraus besteht es?	Natürliche Lebewesen und Stoffe	Menschen und Bauteile	Konstruierte Bauteile
		Natürliche Systeme	Kulturelle Systeme	
		Lebensfähige Systeme		Mechanistische Systeme

Abb. 2-14: Systemarten und Problemebenen

Eigene Darstellung in Anlehnung an (vgl. Ulrich & Probst, 1991, S. 98)

In einem idealisierten Fall, also für einen sehr kurzen Betrachtungszeitraum, scheint sich ein Produktionssystem deterministisch zu verhalten (s. Abb. 2-15a). In dieser Arbeit wird ein deterministisches Systemverhalten so definiert, dass bei gleichem Input der gleiche Output entsteht²⁹. Im idealisierten Fall wird die Annahme eines geschlossenen Umweltverhältnisses getroffen. Dies ist eine gängige Praxis, um das Abstraktionslevel bestimmter Untersuchungen möglichst gering zu halten.

²⁹ Diese Definition folgt der Sichtweise der Informatik. In den Ingenieurwissenschaften ist eine weichere Definition zu beobachten. Hier wird eine Schwankung innerhalb des zulässigen Toleranzbereiches oftmals als deterministisch angesehen.

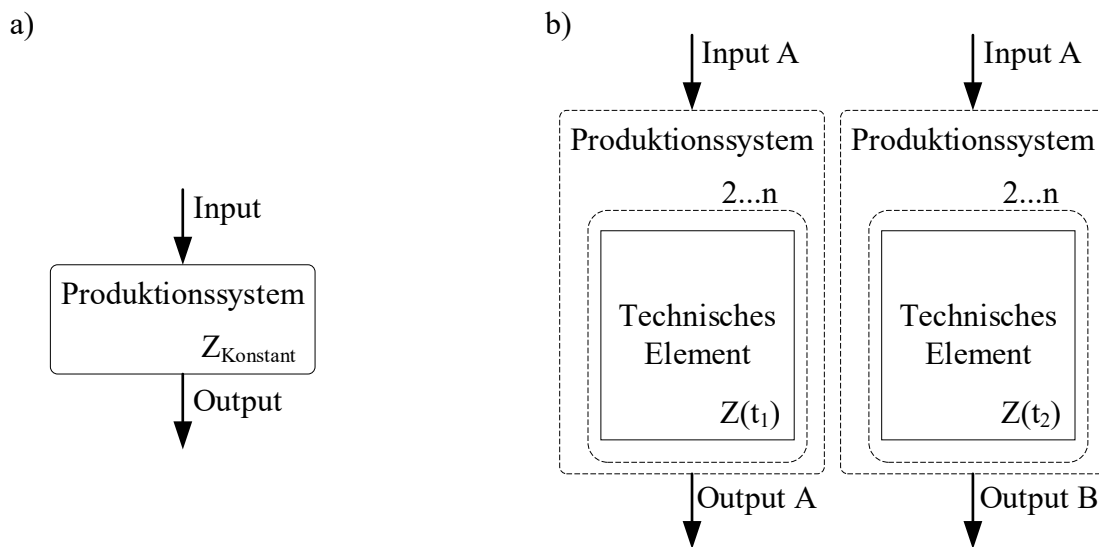


Abb. 2-15: Verhalten von Produktionssystemen bei Kurzzeit- und Langzeitbetrachtung

Eigene Darstellung

Tatsächlich geht aus einer Langzeitbetrachtung von Produktionssystemen hervor, dass diese Idealisierung unzutreffend ist (s. Abb. 2-15b). Der Output desselben Produktionssystems unterscheidet sich zu verschiedenen Zeitpunkten. Es ist also davon auszugehen, dass das Produktionssystem eine Zustandsänderung erfährt. Der Grund für diese Zustandsänderung ist ein Abnutzungseffekt (Verschleiß) durch die Systemaktivität selbst, aber auch Toleranzen der technischen Elemente, wie auch die Systemumwelt nehmen einen Einfluss auf den Systemzustand.

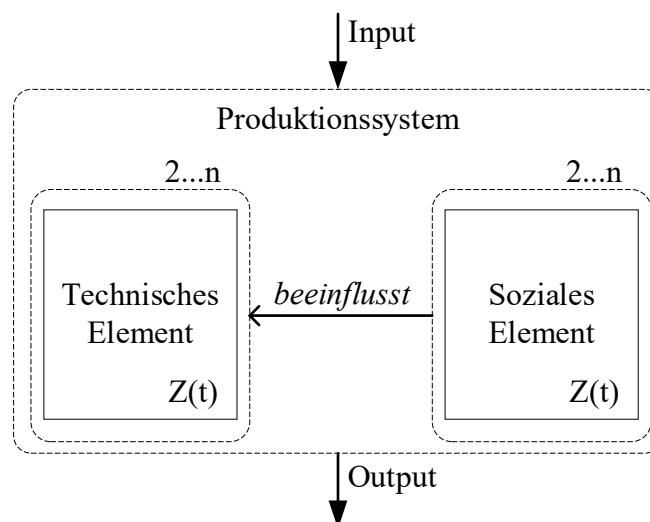


Abb. 2-16: Der Mensch als beeinflussendes Element innerhalb von Produktionssystemen

Eigene Darstellung

Das Produktionssystem ist demnach nur langfristig funktionsfähig, wenn der Mensch diese negative Zustandsänderung korrigiert (s. Abb. 2-16). Der soziale Einfluss kann daher in Form der mechanischen oder elektrischen Instandhaltung auf das System einwirken oder bspw. mittels einer Maschinenbedienung im Rahmen des Produktionsprozesses selbst stattfinden. Auch der Mensch erfährt im Laufe der Produktionsprozesse eine Zustandsänderung. Das stationäre Wissen baut sich auf, während natürliche Ermüdungserscheinungen eintreten. Beide Faktoren beeinflussen die individuelle Problemlösungsfähigkeit (s. 2.3.2), welche somit nicht-deterministisch ist.

Es lässt sich demnach schlussfolgern, dass die Modellierung eines Produktionssystems als deterministisches, technisches System nicht hinreichend genau ist. Auf einen längeren Zeitraum geschaut, würde ein rein technisches Produktionssystem keinen Output mehr generieren. Dieses Szenario bildet eine starke Evidenz dafür, dass der Mensch ein soziales Element des Produktionssystems bildet und dieses somit eine Modellierung als sozio-technisches System erfordert. Das Zielbild der Reifegradstufe 6 des Industrie 4.0-Entwicklungspfades, also die Idee der Umsetzung eines autonom handelnden, rein technischen Produktionssystems, bestätigt zusätzlich diese Annahme.

Dieser hergeleitete Zusammenhang zwischen Technik und Mensch innerhalb eines Produktionssystems ist eine wichtige Erkenntnis, um richtige Lösungen entwickeln zu können. Diverse Datenanalysemethoden führen nicht zum Ziel, wenn die Annahme eines deterministischen Systems getroffen wird.

2.4.3 Technische Elemente von Produktionssystemen

Die technischen Systemelemente eines automatisierten Produktionssystems sind mechanische, elektrische und Software-Elemente (u. a.), welche durch ihr Zusammenwirken als mechatronisches System bezeichnet werden (vgl. VDI/VDE 2206:2021-11, S. 12). Der folgende Abschnitt beschreibt die Charakteristika und Einflussfaktoren der Zustandsänderung dieser technischen Elemente.

Mechanische Elemente dienen der Übertragung von Kräften, Momenten und Bewegungsvorgängen, der Bildung eines physikalischen Schutzes sowie der Verbindung von Bauteilen. Ihre Dimensionierung und Auslegung erfolgt auf Basis statischer und dynamischer Grundgesetze in Abhängigkeit der geplanten Last, Lebensdauer, spezifischen Werkstoffigenschaften und fertigungstechnischen Möglichkeiten. Zur Sicherstellung ihrer Funktionserfüllung müssen Toleranzen, Passungen und Konstruktionsrichtlinien eingehalten werden (vgl. VDI/VDE 2206:2021-11, S. 12) (vgl. Isermann, 2008, S. 19).

Elektronische Elemente dienen dazu, aufgrund von Messgrößen oder Führungsgrößen steuernd und regelnd auf den mechanischen Prozess einzuwirken. Beispiele dieser Elemente sind Mikroelektronik, Leistungselektronik, Messtechnik und Aktorik (vgl. Isermann, 2008, S. 3f). Elektronische Elemente sind meist weniger robust als mechanische, sodass ihre Auslegung an das gemeinsame Einsatzumfeld anzupassen ist (vgl. VDI/VDE 2206:2021-11, S. 28). In Kombination mit der informationsverarbeitenden Funktion einer Software werden Signale zur Regelung oder Dämpfung von Bewegungen verarbeitet. Auf höheren Ebenen erlaubt die digitale Informationsverarbeitung die Überwachung von Grenzwertüberschreitungen, Optimierung von Koordinierung oder Fehlerdiagnose (vgl. Isermann, 2008, S. 25). Das Zusammenspiel dieser benannten Komponenten wird als operative Technologie bezeichnet (vgl. Peschke & Eckardt, 2019, S. 15).

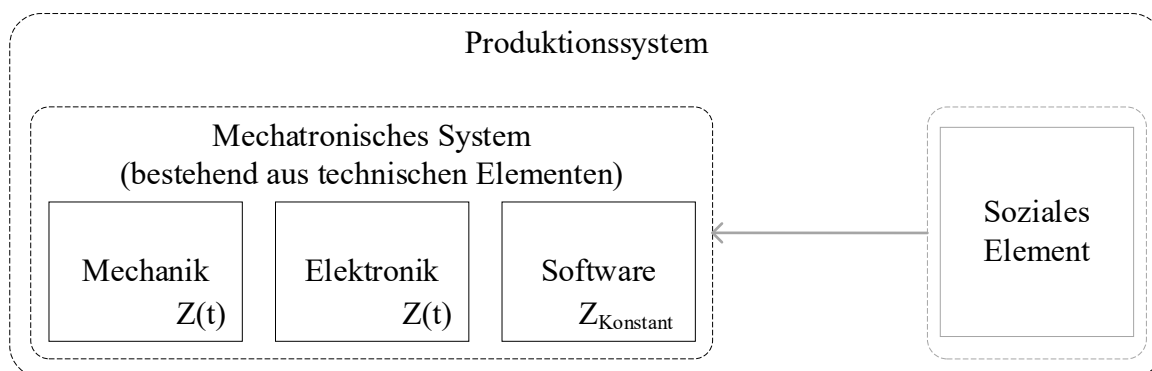


Abb. 2-17: Technische Elemente von Produktionssystemen

Eigene Darstellung

Die mechanischen, elektrischen und Softwareelemente können auf Basis von auftretenden Fehlern eine Zustandsänderung aufweisen (s. Abb. 2-17). Diese können systematisch (aufgrund definierter Ereignisse) aber auch zufällig auftreten. Dies wird über die Fehlerform ausgedrückt. Tab. 2-4 zeigt beispielhaft verschiedene Fehlerarten und –formen für die drei wesentlichen Elemente mechatronischer Systeme.

Element	Fehlerart	Fehlerform
Elektronik	Spezifikations- oder Entwurfsfehler	systematisch
	Kurzschlüsse, lose oder gebrochene Verbindungen, Parameterveränderungen, Kontaktprobleme, Verschmutzung, Korrosion, EMV-Probleme	zufällig
Software	Falsche Spezifikation, Kodierung, Logik, Berechnung, Zahlenüberläufe, usw.	systematisch
Mechanik	Überlastung, Ermüdung, Abnutzung (abrasiv, adhesiv, Kavitation), Korrosion (galvanisch, chemisch, biologisch)	Überwiegend zufällig aber auch systematisch (nach zu hoher Beanspruchung)

Tab. 2-4: Fehlerarten der Elemente mechatronischer Systeme

Eigene Darstellung in Anlehnung an (vgl. Isermann, 2008, S. 562)

2.4.4 Der Mensch als soziales Systemelement von Produktionssystemen

Ein Produktionssystem besteht neben seinen technischen Elementen ebenfalls aus sozialen Elementen. Dieser Zusammenhang wurde in Kapitel 2.4.2 konkret hergeleitet. Das soziale Element eines Produktionssystems sind Menschen, die verschiedene Aufgaben in dem System innehaben können. Im folgenden Abschnitt wird beispielhaft die Qualitätssteuerung als Aktivität des Menschen im fertigungstechnischen Produktionssystem beschrieben und damit das strukturelle Systemkonzept detailliert. Im Rahmen der weiteren Disziplinen der Produktionstechnik können selbstverständlich andere, weitere Aufgaben dem Menschen zugeordnet werden.

Die Aktivität zur Qualitätssteuerung beginnt (s. Aktivitätsdiagramm Abb. 2-18), wenn die Effizienz eines Produktionsprozesses außerhalb des definierten Grenzwertes liegt. Es entstehen Produkte, deren Qualitätsmerkmale nicht in Ordnung (n.i.O.) sind, also nicht den definierten Qualitätsanforderungen entsprechen. Der Mensch ermittelt das unzureichend erfüllte Qualitätsmerkmal des Produktes (Wirkung) und kennt bestenfalls die Ursache des Effekts (stationäres Wissen). Ist das stationäre Wissen nicht vorhanden, können mittels diverser Qualitätsmanagementmethoden Zusammenhänge unter Nutzung der allgemeinen Erfahrungswerte (potentielles Wissen) erschlossen werden. Im Falle eines nicht-trivial zu ermittelnden Zusammenhangs wird auf die Informationsbeschaffung durch bspw. Befragung von Kollegen (individuelles/ kollektives Prozesswissen) oder die Informationsgenerierung zurückgegriffen. Diese kann mittels konventioneller oder datenbasierter Methoden erfolgen. Reichen die Informationen zur Ermittlung der Ursache aus, wird die Qualitätsverbesserung eingeleitet.

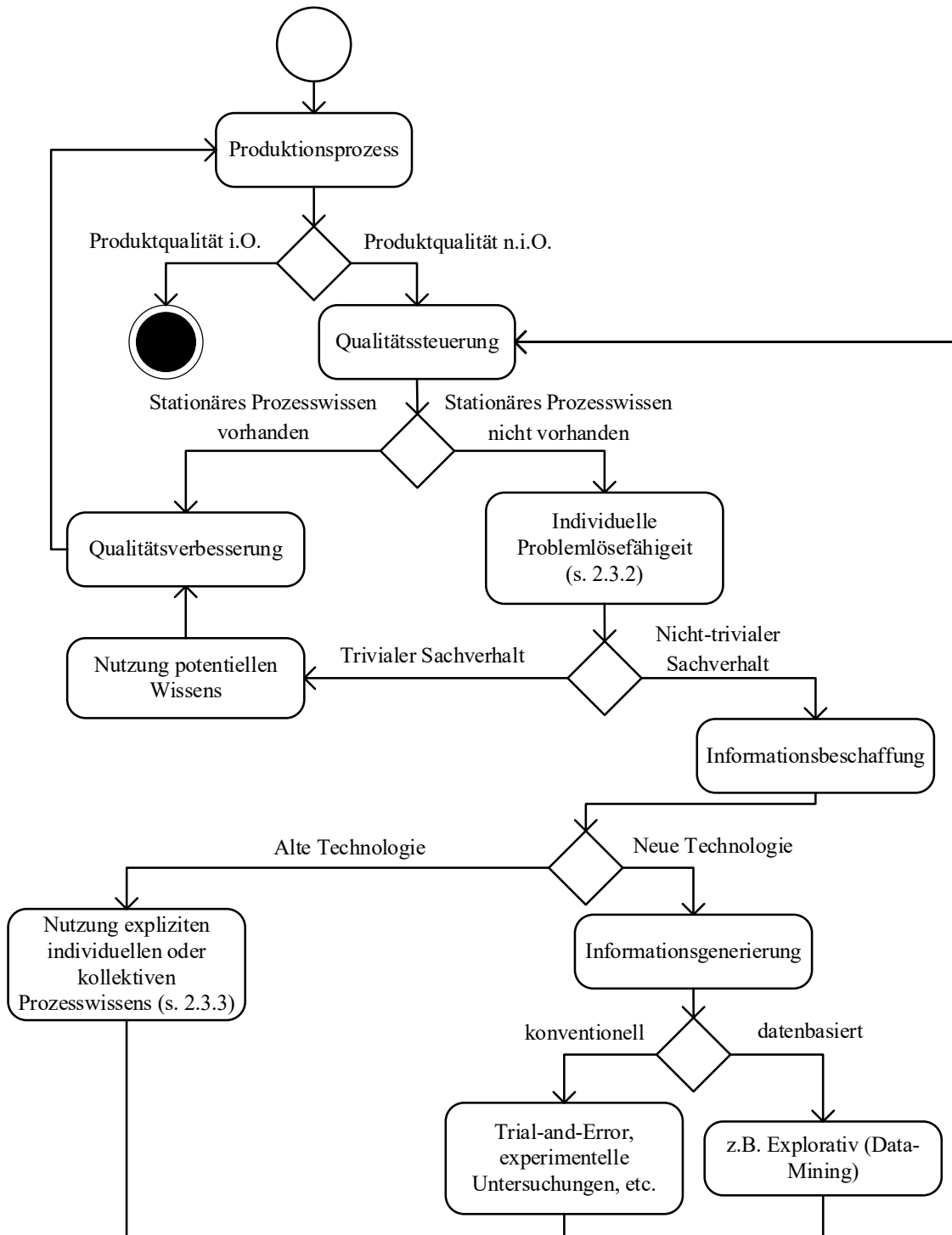


Abb. 2-18: Aktivitätsdiagramm der Qualitätssteuerung in Verbindung der individuellen Problemlösungsfähigkeit

Eigene Darstellung

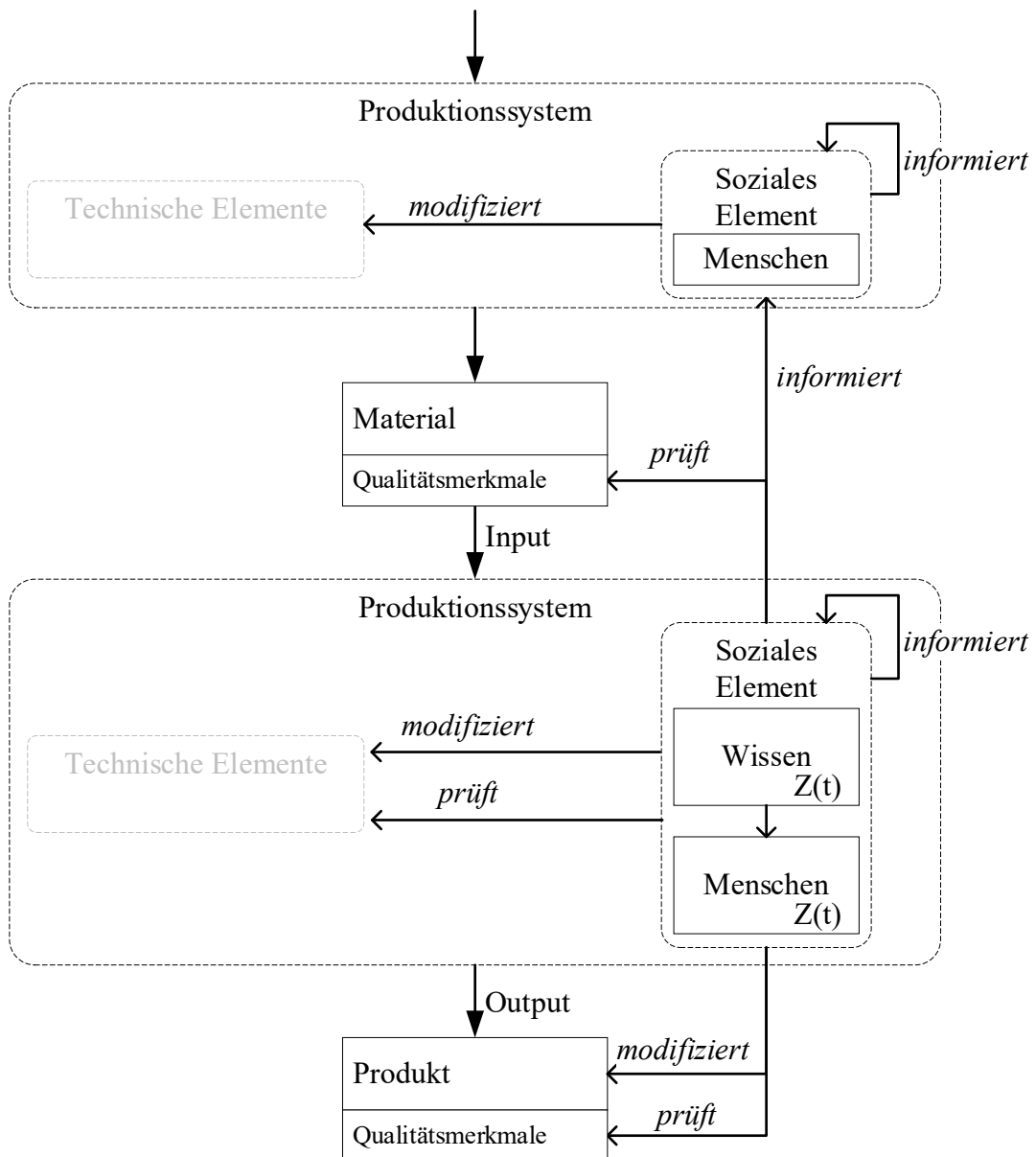


Abb. 2-19: Strukturales Konzept der sozialen Elementen von Produktionssystemen

Eigene Darstellung

Die Ursachen können verschiedene Aktionen erfordern, wie bspw. die Modifikation der technischen Elemente des Produktionssystems. Die Durchführung der Aktionen kann durch andere Personen verschiedener Rollen durchgeführt werden (mechanische oder elektrische Instandhaltung, Steuerungsprogrammierer, Maschinenbediener, etc.) (s. Abb. 2-19).

3 Konkretisierung der Forschungsfrage

Im vergangenen Jahrzehnt ist die wissenschaftliche Arbeit in den Forschungsfeldern der Industrie 4.0 und der Digitalisierung, welche die Wegbereiterin der Industrie 4.0 ist, zunehmend angestiegen. Das betrifft sowohl die Neuplanung von Anlagen als auch bestehende Produktionsanlagen in Fabriken. Aufgrund ihrer Langlebigkeit stellt die Befähigung bestehender Produktionsanlagen hinsichtlich der Digitalisierung einen häufigeren Anwendungsfall in der industriellen Praxis dar, weshalb der Fokus dieser Arbeit auf das Retrofitting dieser Anlagen gelegt wird. Die Literaturrecherche von NOWACKI ET AL. zeigt, dass Retrofittings im wissenschaftlichen Umfeld betrieben werden und diese einer ähnlichen Vorgehensweise folgen (vgl. Nowacki, Ritter, Lüder, & Behnert, 2021). Allerdings sind diese einerseits unter „Laborumständen“ durchgeführt worden und andererseits referenzieren diese Arbeiten auf keine übergreifende Vorgehensmethodik, sondern folgen einer explorativen Vorgehensweise. Daher liefern die wissenschaftlichen Arbeiten nur wenig Synergien, welche im realen Industrieumfeld als Best Practice genutzt werden können. Ein Konzept des VDMA zeigt einen Leitfaden für den Retrofit. Es fehlen allerdings konkrete Lösungsansätze zur Ermittlung eines konkreten Geschäftskonzeptes oder die Bereitstellung konkreter, technischer Lösungsansätze (vgl. VDMA Forum Industrie 4.0, 2020).

In den Kapiteln 2.2 und 2.3 wurde dargestellt, dass bereits einige Lösungen für konkrete Teilprobleme im Industrie 4.0-Kontext entwickelt und erprobt wurden. Doch es stellt sich die Frage: Unter der Prämisse, dass diese technischen Einzellösungen grundsätzlich valide sind, wieso fällt es der Industrie so schwer die Industrie 4.0 umzusetzen? Hierzu können zwei Gründe identifiziert werden.

Erstens: Die technischen Teillösungen werden in nur wenigen Arbeiten detailliert zu einem Gesamtkonzept zusammengeführt. Die wissenschaftliche Sprache der Abhandlungen stellt eine zusätzliche Hürde für die praktische Anwendung in Betrieben dar. Die bisherige Kernaufgabe der klassischen, mechatronischen Gewerke ist, automatisierte Produktionsprozesse unter der Bedingung manueller Regulierung im laufenden Prozess zu realisieren. Diese Aufgabe hat sich in den vergangenen Jahren im Rahmen der Automatisierung manifestiert. Mit zunehmender Popularität der Industrie 4.0 ergänzt sich diese bestehende Aufgabe um weitere Handlungsfelder, wie beispielsweise der Datenbereitstellung aus Produktionsanlagen (Konnektivität) und stärkeren Einbindung der IT. So weitet sich auch das Aufgabenfeld der Informatik auf die Produktionssysteme aus, welches ursprünglich eher sekundär zu ihrem Aufgabengebiet gehörte. Für diese neuartige Zusammenarbeit fehlt ein konkretes Handlungsschema für Beschäftigte der verschiedenen Domänen in Industriebetrieben, welches als Best Practice fungiert. Zweitens: Diese neue

Zusammensetzung der involvierten Gewerke führt zu einer neuen Dimension der Interdisziplinarität. Nicht nur die Sprache der wissenschaftlichen Abhandlungen stellt demnach eine Hürde dar, sondern auch die gewerkspezifischen Begrifflichkeiten. Das führt entweder zu grundsätzlichem Unverständnis oder zu Missverständnissen, wenn dieselben Begriffe mit bspw. jeweils anderer Definition verwendet werden. Zusätzlich erweitert die Nutzung der resultierenden Arbeitsergebnisse aus der Industrie 4.0 den klassischen Aufgabenbereich der regulierenden Tätigkeit von Prozessingenieuren. Jedes der in Industrie 4.0 involvierten Gewerke gewinnt nun an Aufgaben hinzu. Das Konzept Industrie 4.0 verhält sich demnach klar sozio-technisch, wie es auch von den Initiatoren ursprünglich klar definiert wurde. In den überwiegenden Lösungskonzepten zur Industrie 4.0 wird ausschließlich der technische Aspekt modelliert und die soziale Komponente vernachlässigt.

Orientiert an den Industrie 4.0 Reifegradstufen befindet sich die Produktion der deutschen Industrie überwiegend auf der Stufe „Computerisierung“. Um nun die erste praktisch nützliche Stufe der Industrie 4.0, die Transparenz, zu erreichen, wird ein Konzept benötigt, um aufbauend auf der bestehenden Computerisierung die Stufen Konnektivität und Sichtbarkeit herzustellen. Daraus leitet sich folgende Forschungsfrage ab:

Können die bisherigen wissenschaftlichen Erkenntnisse in der Digitalisierung und Industrie 4.0 zu einem praktischen, sozio-technischen Gesamtkonzept in zielgruppenorientierter Sprache vereinigt werden, um die Reifegradstufe der Transparenz eines Produktionsprozesses zu erreichen?

Das erste Forschungsziel ist damit die Entwicklung einer generischen Referenzarchitektur zur Industrie 4.0 vor dem Hintergrund des sozio-technischen Gestaltungsansatzes. Den Ausgangspunkt bildet dabei die Computerisierung, die als Prämisse bereits überwiegend vorhanden sein muss. Die Referenzarchitektur berücksichtigt sowohl die deterministischen, technischen als auch die stochastischen, soziologischen Systemkomponenten. Die Evaluation des Forschungsziels erfolgt über die Aufnahme der konkreten Ausgangs- sowie Zieldefinition im Produktionsumfeld anhand eines prototypischen Anwendungsfalles.

Das zweite Forschungsziel ist die Ableitung einer konkreten, modularen Vorgehensmethodik basierend auf der entwickelten Referenzarchitektur. Dabei werden die bisher entwickelten, technischen Teillösungen verwertet und um den soziologischen Aspekt ergänzt. Die Methodik ermöglicht die Überwindung der Einstiegsschwelle in die Industrie 4.0 durch eine zweckorientierte Herstellung der Konnektivität basierend auf einem konkreten Ziel zur Erreichung der Transparenz und durch eine zielgruppenorientierte Erläuterung, sodass eine interdisziplinäre Zusammenarbeit in dem erforderlichen Maß ermöglicht wird. Die Evaluation erfolgt anhand eines Prototypen zur Darstellung eines konkreten Anwendungsbeispiels.

4 Ableitung einer erweiterten Referenzarchitektur aus bekannten Modellen

In den vorhergehenden Kapiteln wurde verdeutlicht, dass Industrie 4.0 das aktuelle Verständnis der automatisierten Fertigung erweitert und die verschiedenen involvierten Domänen zu einer neuen Form der Zusammenarbeit bringt. Das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0) wurde u.a. dazu entwickelt, um Aktivitäten im Rahmen der Industrie 4.0 zu verorten. Diese Arbeit bedient sich dem Hilfsmittel, um die fachliche Verortung des Forschungsbeitrages im Folgenden vorzunehmen.

4.1 Einordnung im RAMI 4.0

Das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0) wurde in Kooperation mehrerer deutscher Industrieverbände entwickelt, um einen technischen Gegenstand (Asset) entlang des gesamten Lebenslaufes aus den verschiedenen Blickwinkeln zu beschreiben. Der Begriff „Asset“ ist in diesem Kontext sehr allgemein gehalten und kann sowohl ein Produktionssystem, eine Komponente dessen, ein durch das Produktionssystem gefertigtes Gut oder gar ein Unternehmen selbst beschreiben. Die bisherige Betrachtungsweise eines realen, physischen Assets wird um eine virtuelle Beschreibung dieses Assets ergänzt, die Industrie 4.0-Komponente. In der Praxis werden involvierte Domänen befähigt, ihren Diskussionsgegenstand der Zusammenarbeit innerhalb des Modells exakt zu verorten. Aus wissenschaftlicher Sicht wird das RAMI 4.0 verwendet, um Lücken der Standardisierung aufzuzeigen und einen fachlichen Beitrag konkret einzuordnen (vgl. DIN SPEC 91345:2016-04).

Die fachliche Verortung dieses Beitrages ist in Abb. 4-1 aufgeführt. Die Arbeit lässt sich entlang der Verlauf-Achse (Life Cycle & Value Stream) in der Phase „Instance: Production“ verorten.

Prozesskorrektur ist reaktiv und kann aufgrund der Komplexität von Produktionsprozessen je nach Erfahrung des verantwortlichen Mitarbeiters zeitlich stark variieren. Es stellt sich die Frage, inwiefern solch eine Prozesskorrektur beschleunigt werden kann. Eine mögliche Antwort darauf liefert das Konzept der Industrie 4.0, indem Informationen zu einer Produktinstanz schneller für die Mitarbeiter zugänglich werden. Mithilfe von Laufzeitinformationen zu den Merkmalen eines Produktes (9) können allgemeine Ursache-Wirkungszusammenhänge komplexer Prozesszusammenhänge (s. Stufe 4 Transparenz in Abb. 2-6) untersucht werden, um das Wissen der Mitarbeiter des spezifischen Fertigungsprozesses zu steigern. In regulären Produktionsprozessen sind Produkte selbst jedoch nicht fähig, diese Informationen über ihre Merkmale bereitzustellen (10). Das Ausschöpfen des Informationspotentials kann dennoch ermöglicht werden, indem die Produktionssystemkomponenten zu einer Bereitstellung der Merkmale befähigt werden (11). Diese spezifische Form des Reengineering, die nachträgliche Befähigung zur Kommunikation von bereits bestehenden Produktionsanlagen (Brownfield), wird Retrofitting genannt. Die Prämisse hinsichtlich der Produktinstanzen ist eine eindeutige Identifikation (12).

4.2 Referenzarchitektur zur Herstellung der Konnektivität

Dieses Kapitel erweitert das Modell zur Industrie 4.0-Komponente (s. 2.3.4) zu einer erweiterten Referenzarchitektur für die Herstellung der Konnektivität. Die Erweiterung der Architektur ermöglicht es, direkte Beziehungen zwischen prozessualen Informationsbedarfen über physische Assets und den dazu benötigten Datenpunkten in der Verwaltungsschale zu bilden. Der Grundgedanke wurde von NOWACKI ET AL. bereits in ihrer Arbeit präsentiert und wird im Rahmen dieses Kapitels stärker verfeinert (vgl. Nowacki, Ritter, Lüder, & Behnert, 2021).

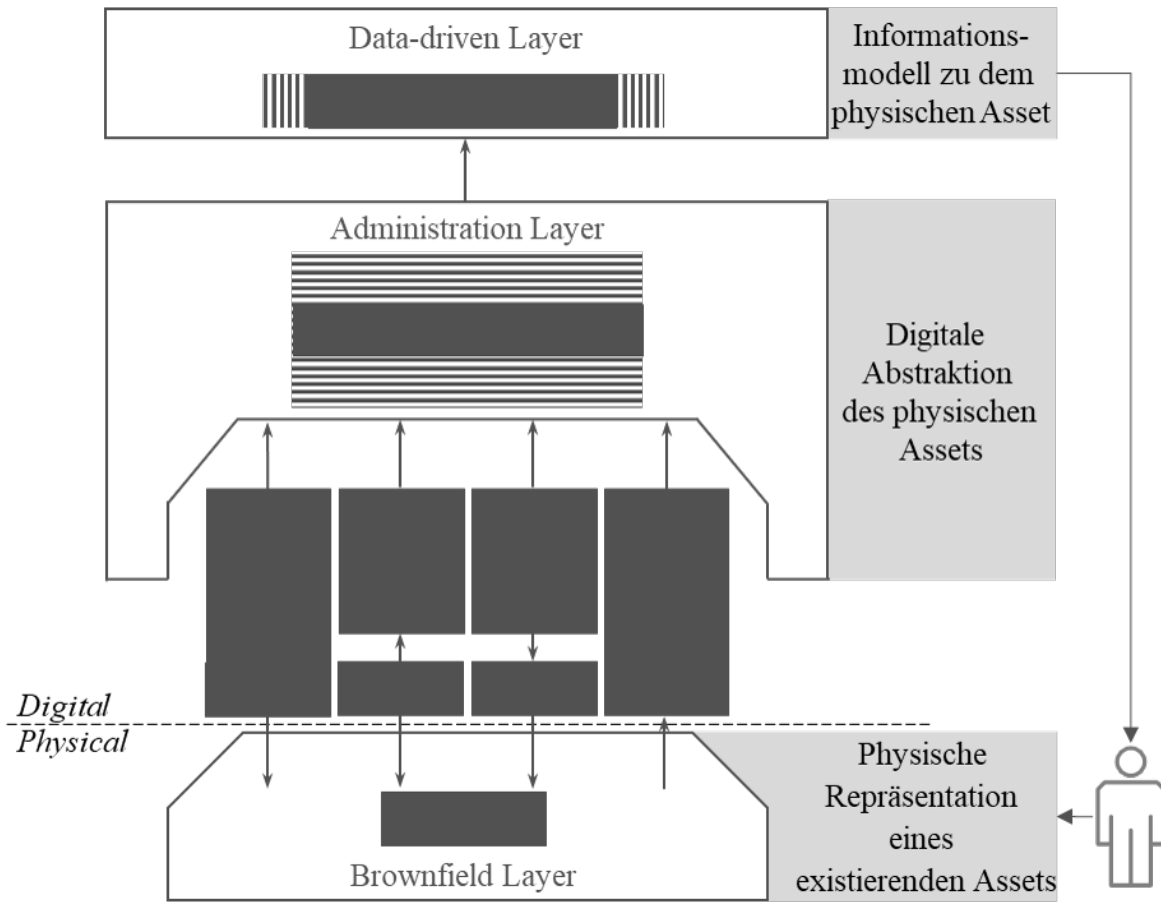


Abb. 4-2: Grundstruktur der erweiterten Referenzarchitektur

Eigene Darstellung auf Basis von (vgl. DIN SPEC 91345:2016-04)

Die Abb. 4-2 zeigt die grundsätzliche Struktur, auf die sich dieses Kapitel im Folgenden stützt. Die Basis bildet der, in der physischen Welt befindliche „Brownfield Layer“. In dieser Schicht wird der Betrachtungsgegenstand, das physische Asset³⁰, repräsentiert. Die digitale Abstraktion dieses Assets erfolgt in dem Administration Layer³¹. Die nachfolgende Schicht des Data-driven Layer ist die Schicht, auf der die prozessualen Informationsmodelle zu dem Betrachtungsgegenstand³² gebildet werden. Diese Informationen werden von Mitarbeitern (Prozessingenieuren) genutzt, um Änderungen in der physischen Welt vorzunehmen (Prozesssteuerung). Der detaillierte Aufbau der Referenzarchitektur wird in dem folgenden Text beschrieben und folgt grundsätzlich der Legende nach Abb. 4-3.

³⁰ In diesem Kontext ist das produzierte Gut als Resultat eines Produktionsprozesses gemeint, z.B. ein Stator (s. 6.1).

³¹ Welches bspw. mittels der Verwaltungsschale realisiert werden kann (s. 2.3.4).

³² Gemeint sind hiermit aufbereitete Prozessinformationen, die mittels Datenanalysemethoden über das physische Asset bereitgestellt werden (s. 6.11).










- 1)-II) Schritte des Retrofitting-Leitfadens (s. Kapitel 5)
-  Strukturierungseinheiten der Industrie 4.0-Komponente
 -  Strukturierungseinheiten
 -  Elemente der Industrie 4.0-Komponente
 -  Elemente der zugehörigen Strukturierungseinheit
 -  Mögliche Wege des Retrofitting
 -  Element-Duplikationen
 -  Reifegradstufe des Stufenmodell des Industrie 4.0-Entwicklungspfades
 -  Prozessingenieur
 -  Individuelle Problemlösungsfähigkeit

Abb. 4-3: Legende für die erweiterte Referenzarchitektur

Eigene Darstellung in Anlehnung an (vgl. Nowacki, Ritter, Lüder, & Behnert, 2021)

Das klassische, automatisierte Produktionssystem (s. Abb. 4-4) besteht aus technischen und sozialen Elementen, wie in Kapitel 2.4 beschrieben. Damit befindet sich das System sowohl in der physischen als auch digitalen Welt. Das *Brownfield Asset* beschreibt in dieser Darstellung ein gefertigtes Produkt oder Teilprodukt, welches von dem Produktionssystem ausgegeben wird. Der Qualitätszustand jedes Assets lässt sich anhand seiner physischen *Attribute* (wie bspw. Geometrie- oder Materialeigenschaften, etc.) beschreiben. Diese Attribute werden von einer Vielzahl technischer Komponenten des mechatronischen Produktionssystems geprägt. Da die Prämisse der Computerisierung (①) getroffen wird, handelt es sich hier überwiegend um automatisierte Komponenten. Automatisierte, technische Komponenten erzeugen und verarbeiten Ein- und Ausgangssignale von Sensoren sowie Aktoren und bilden damit eine Datenquelle (*Source*). Aus den, in den Quellen vorliegenden, Daten kann die Ausprägung der physische Attribute abgeleitet werden. Im Falle einer unzureichenden Assetqualität bewertet das soziale Element des Produktionssystems, der *Prozessingenieur*, anhand von Beobachtungen der Assetattribute die Prozessqualität und leitet einen Handlungsbedarf zur Prozesskorrektur ab. Abhängig von der *individuellen Problemlösungsfähigkeit* bezüglich des spezifischen Produktionssystems erarbeitet der Prozessingenieur eine Strategie zur Modifikation der technischen Komponenten, sodass die geforderte Assetqualität erreicht wird. Diese Problemlösungsfähigkeit kann unter Umständen auch Lücken aufweisen.

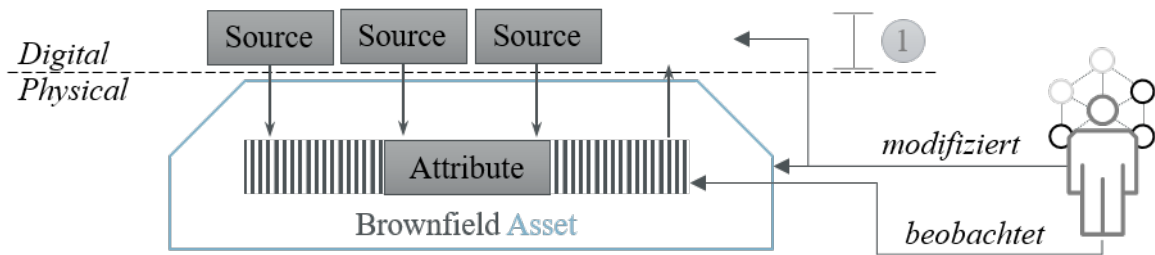


Abb. 4-4: Klassisches, automatisiertes Produktionssystem

Eigene Darstellung in Anlehnung an (vgl. Nowacki, Ritter, Lüder, & Behnert, 2021)

Ein erstes cyber-physisches System entsteht, indem die Attribute des Brownfield Assets entsprechend eines Modells (*Asset Administration Shell*) digital sichtbar werden (s. Abb. 4-5). Die Bereitstellung der Daten erfolgt über die Herstellung der Konnektivität (②). Um eine Datenbereitstellung aufzubauen, bestehen mehrere Möglichkeiten der technischen Erweiterung durch *Adapter* in Abhängigkeit von der vorliegenden Datenquelle (vgl. Walenza-Slabe, 2017, S. 7).

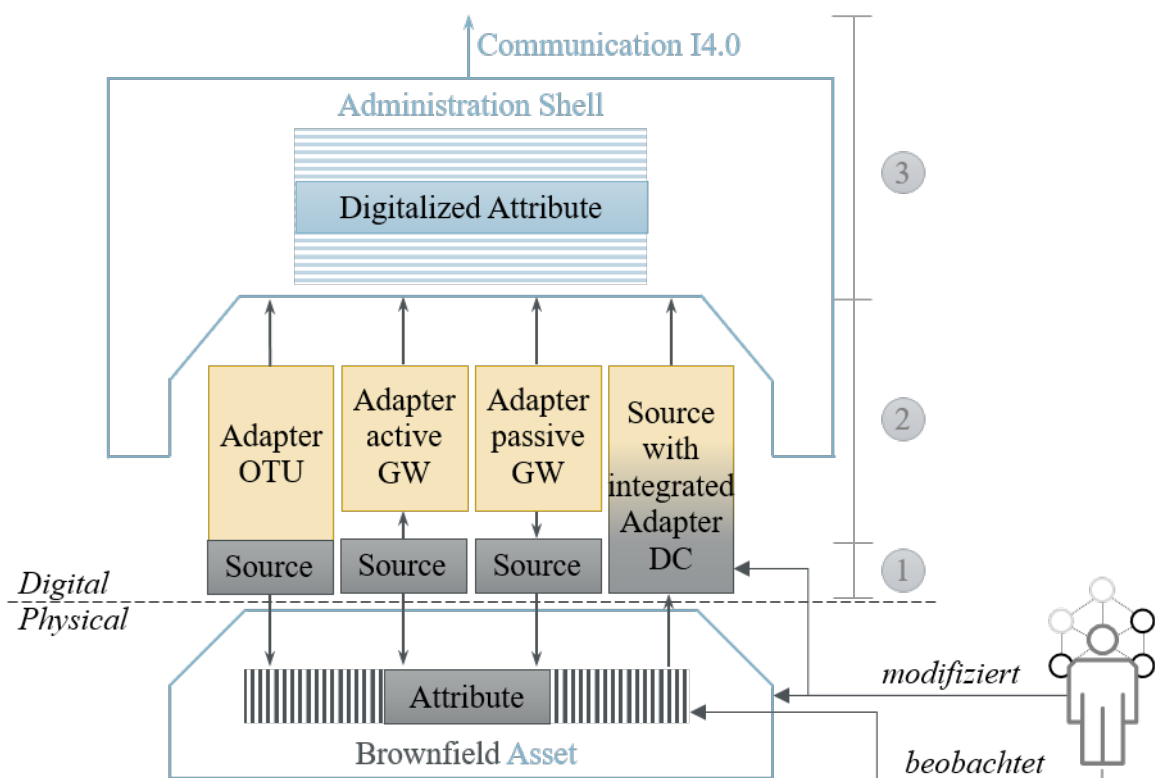


Abb. 4-5: Cyber-physisches Produktionssystem

Eigene Darstellung in Anlehnung an (vgl. Nowacki, Ritter, Lüder, & Behnert, 2021)

Die modernste Form technischer Komponenten wird bereits mit der Möglichkeit einer direkten Datenbereitstellung (*Source with integrated Adapter Direct Communication (DC)*) ausgestattet. Es ist erforderlich, die verfügbare Schnittstelle entsprechend einzurichten. Das

kann einerseits für bereits integrierte Komponenten des Produktionssystems gelten. Ein anderer Fall für den Einsatz derartiger Adapter ist bei noch nicht digital-vorliegenden Attributen. Um eine Computerisierung von Attributen zu ermöglichen können zusätzlich sogenannte „IoT Sensoren“ in Produktionssystemen implementiert werden, die gleichzeitig die Fähigkeit zur Konnektivität innehaben. Diese Sensoren können meistens nur einen beschränkten Zweck erfüllen und nicht die Komplexität der steuerungsinternen Abläufe nachbilden. Doch in ausgewählten Fällen bilden diese eine kostengünstige und unkritische Lösungsalternative zur Datenaufnahme.

Eine weitere Option bilden *Adapter OT-Upgrade (OTU)*. Diese bieten einige Vorteile. Durch ein Upgrade wird die ohnehin implementierten Datenquellen befähigt, Daten bereitzustellen. Es besteht die Möglichkeit, zukünftig weitere Updates des Anlagenherstellers zu implementieren, welche helfen können, eine umfangreichere Datenbasis zu schaffen. Die Einsparung weiterer Komponenten vermindert zudem das Ausfallrisiko zusätzlicher Komponenten. Da die Anlagenhersteller meist eigens diese Lösung entwickeln, besteht mit diesem Weg ebenfalls die Möglichkeit, nicht nur lesend, sondern auch schreibend auf die Steuerungstechnik zuzugreifen. Eine Restriktion könnte sich in der Performance des Steuerungsprogrammes widerspiegeln.

Ähnlich zu dem OT-Upgrade verhält sich die Adaptierung mithilfe eines aktiven Gateways (*Adapter active GW*). Für die vielen verschiedenen proprietären Protokolle der Anlagenhersteller werden diverse Lösungen von unterschiedlichen Anbietern zur Verfügung gestellt. Diese können zumeist lesend, aber auch schreibend, auf die Steuerungstechnik zugreifen. Restriktiv bei der Wahl dieser Lösung ist, dass Abfragen an die Steuerung zu Überlastungen führen können. Bei zukünftigen Aktualisierungen der Steuerung selbst kann das manuell durchgeführte Daten-Mapping oder Kompatibilität mit dem Steuerungsprogramm überholt sein und muss neu aufgesetzt werden. Durch die zusätzlich eingeführte Komponente besteht die Möglichkeit eines Hardwareausfalls. Abhilfe kann hier ein globales Device Management schaffen.

Sind die attribut-prägenden Quellen unbekannt oder liegt eine andere Einschränkung vor, kann ein passives Gateway (*Adapter passive GW*) Abhilfe schaffen. Diese Form dupliziert an einer ausgewählten Hardwareschnittstelle die gesamte Kommunikation, welche im Anschluss gemappt werden muss. Dadurch dass kein direkter Eingriff in die Steuerungstechnik stattfindet, besteht hierbei weniger die Gefahr, dass Performanceeinbußen der Steuerung zu erwarten sind. Ein Nachteil besteht allerdings darin, dass nur die ein- und ausgehenden Signale dupliziert werden. Zwischenergebnisse der Steuerungstechnik müssen digital aus den vorhandenen Signalen nachgebildet werden. Ebenso

wie bei den aktiven besteht auch bei passiven Gateways die Gefahr, dass ein Mapping aufgrund Steuerungsupdate wiederholt werden muss.

Die Implementierung derartiger Adapter ermöglicht es, die physischen Attribute digital abzubilden (*Digitalized Attribute*). Die digitalisierten Attribute werden mithilfe gängiger Datenmodellierungsmethoden (s. Kapitel 5.8) in der Administration Shell abgebildet. Es wird die Reifegradstufe der Sichtbarkeit (③) erreicht, wodurch ein cyber-physisches System entsteht.

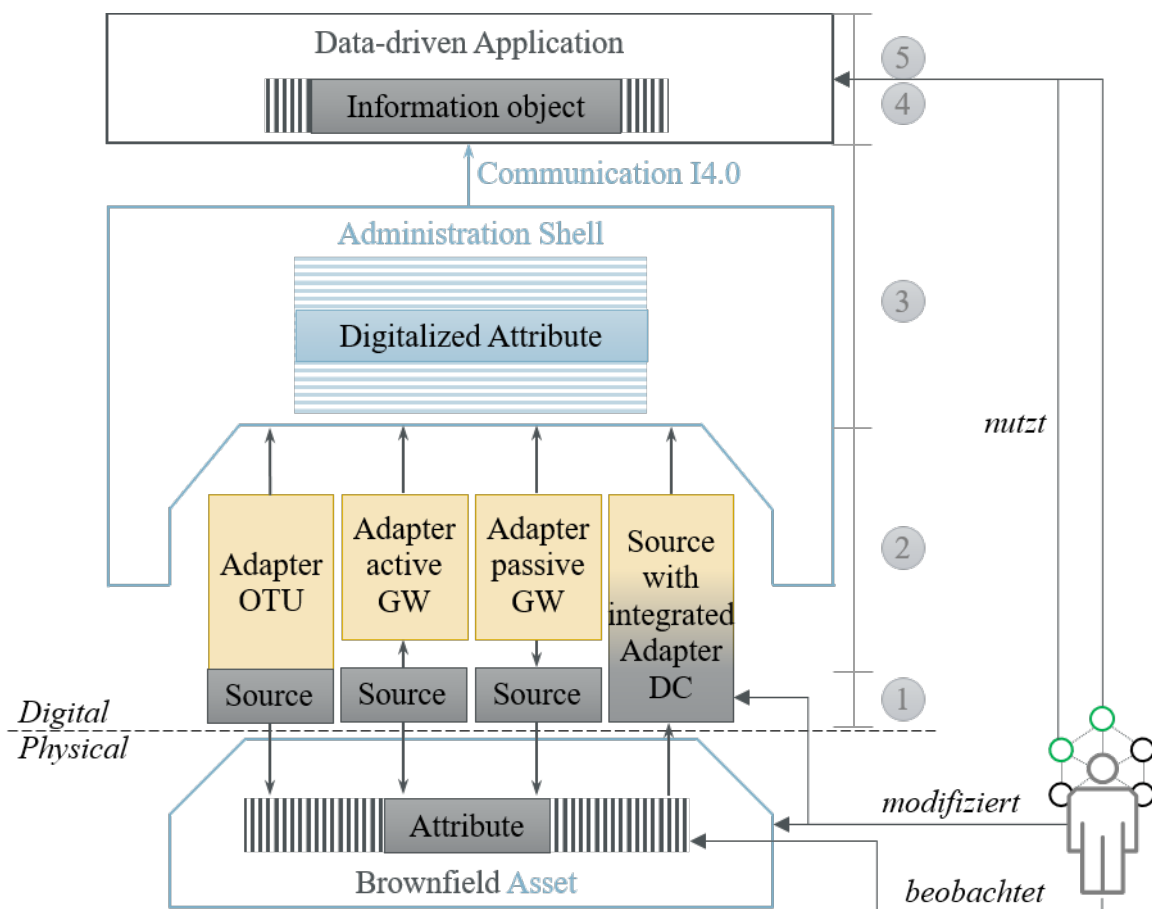


Abb. 4-6: Cyber-physisches Produktionssystem mit Datennutzung

Eigene Darstellung in Anlehnung an (vgl. Nowacki, Ritter, Lüder, & Behnert, 2021)

Die Paarung eines cyber-physischen Systems mit einem Datenanalyse-System (*Data-driven Application*) ermöglicht die Aufbereitung der gewonnenen Daten zu prozessrelevanten Informationen (*Information object*) (s. Abb. 4-6). Der Prozessingenieur nutzt diese Informationen zur Optimierung der individuellen Problemlösungsfähigkeit. In Abhängigkeit von der Art der Informationen wird die Reifegradstufe Transparenz (④) oder Prognosefähigkeit (⑤) erreicht. So wird eine verkürzte reaktive oder eine proaktive Handlung des Prozessingenieurs ermöglicht. Der Interpretationsspielraum des Prozessingenieurs als soziale Systemkomponente wird verringert.

Die Idee eines autonom agierenden Produktionssystems ist in Abb. 4-7 gezeigt. Dieses Szenario zeigt, dass die Prozesskorrektur nicht mehr durch einen Menschen, sondern durch die Maschine selbst vorgenommen wird. In solch einem Fall muss gewährleistet sein, dass die eingerichteten Datenverbindungen zu jeder Zeit bestehen und alle notwendigen Datenpunkte gewonnen werden. Daten werden nun nicht mehr nur zu Informationen aggregiert, sondern die generierten Informationen müssen wieder in Form von Stellsignalen an die technischen Komponenten des Produktionssystems zurückgeschrieben werden. Dieses Szenario wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

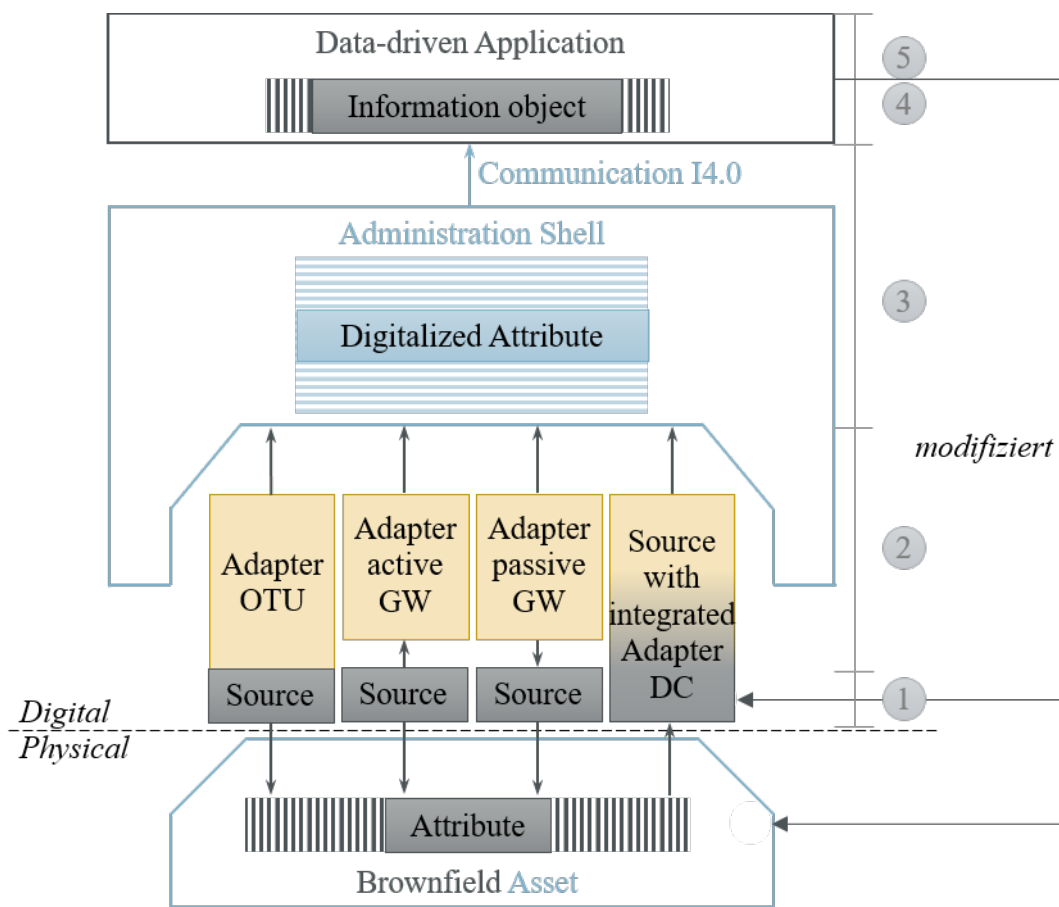


Abb. 4-7: Autonom-agierendes Produktionssystem

Eigene Darstellung in Anlehnung an (vgl. Nowacki, Ritter, Lüder, & Behnert, 2021)

Das Ziel dieser Arbeit ist die Reifegradstufe der Transparenz, die mit der in Abb. 4-6 dargestellten Architektur erreicht wird. Die Informationsobjekte sind das Schlüsselement des gesamten Modells. Der konkrete Informationsbedarf des Prozessingenieurs ist das entscheidende Kriterium für die Realisierung der Informationsobjekte. Eine Über- oder Untererfüllung des Informationsbedarfes stellt eine Verschwendung dar (vgl. Karch, et al., 2023). Die Identifikation des Informationsbedarfs zu dem spezifischen Produktionssystem ist eine verkettete Abfolge der zu treffenden Entscheidungen über:

- die Gestaltung der Informationsobjekte,
- die Identifikation der digital bereitzustellenden Assetattribute,
- die Ermittlung der Datenquellen, geeigneter Adapterstrategien und Datenübertragung,
- die Datenmodellierung.

Aufbauend auf der gezeigten erweiterten Referenzarchitektur wird im nachfolgenden Kapitel der Leitfaden für die praktische Umsetzung erläutert. Damit wird der Empfehlung GUNTHER KEGELS, Präsident des ZVEI, gefolgt, der in einem Interview sagte: „*Man überlege sich zunächst ein Geschäftsmodell und digitalisiere nur so weit, wie man es für dieses Angebot brauche.*“ (Giersberg, 2020).

5 Methodik zur Gewinnung repräsentativer Prozessinformationen zu Produktionssystemen

Dieses Kapitel präsentiert das grundlegende Forschungsergebnis. Es wird eine Methodik dargestellt, die als praxisorientierter Leitfaden herangezogen werden kann, um repräsentative Prozessdaten für einen weiterführenden Erkenntnisgewinn aus Datenanalysen zu erhalten. Die Methodik ist primär auf bereits automatisierte Produktionssysteme (Brownfield) anzuwenden. Deshalb wird diese auch als Retrofitting-Methode bzw. Leitfaden bezeichnet. Die grundlegende Idee zu dieser Methodik wurde in ihren Grundzügen bereits von NOWACKI ET AL. vorgestellt (vgl. Nowacki, Ritter, Lüder, & Behnert, 2021). Die einzelnen Schritte werden im Rahmen dieses Kapitels deutlich detaillierter ausgearbeitet.

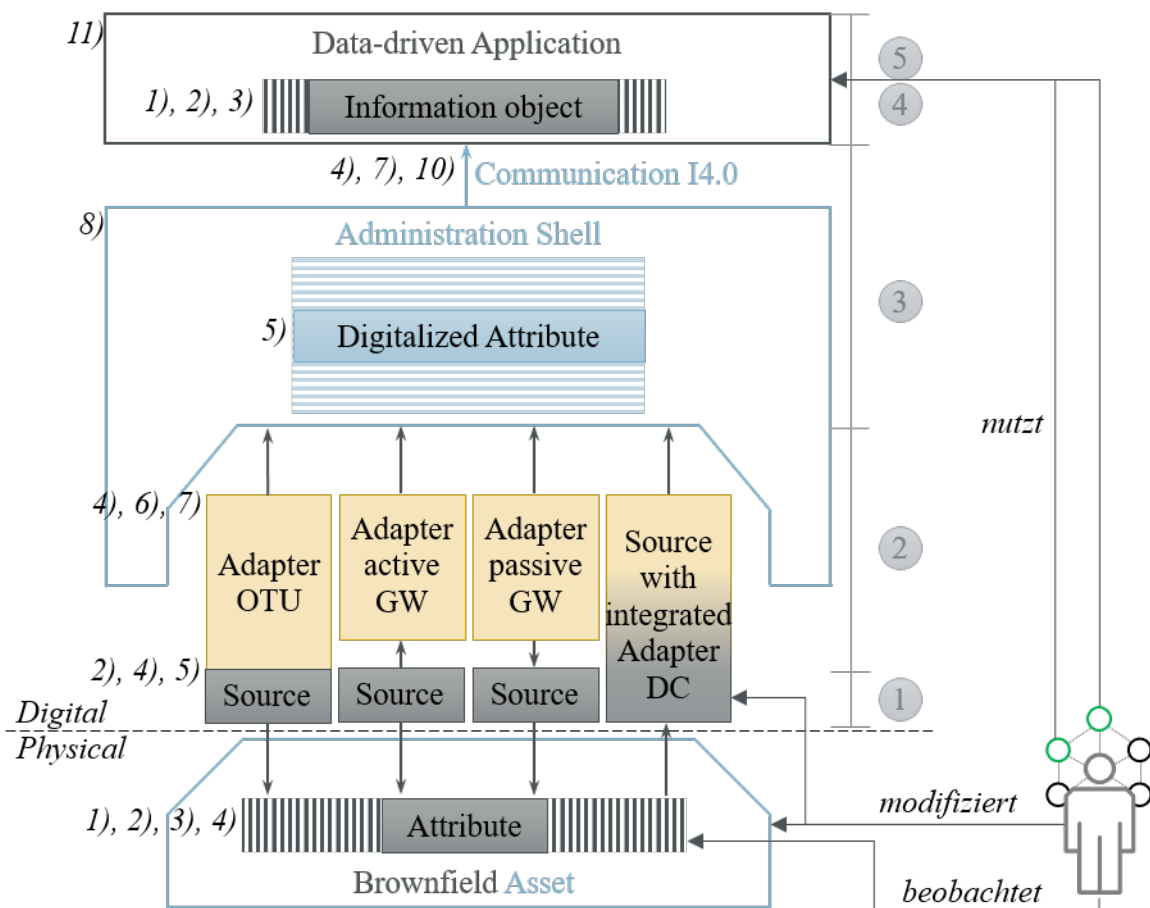


Abb. 5-1: Schritte des Retrofit-Leitfadens entlang der erweiterten Referenzarchitektur

Eigene Darstellung in Anlehnung an (vgl. Nowacki, Ritter, Lüder, & Behnert, 2021)

Visuell unterstützt wird die Methodik durch die Nutzung der, in Kapitel 4.2 vorgestellten, erweiterten Referenzarchitektur (s. Abb. 5-1). Für die schrittweise Erfüllung der Methodik wird die erweiterte Referenzarchitektur aus logischer Betrachtungsweise für jedes System vertikal aufgebaut. Während der Erarbeitung der einzelnen Unterkapitel werden sukzessive

konnektivitätsrelevante Artefakte des betrachteten Systems erarbeitet. Die elf Schritte des Leitfadens spiegeln sich in Abb. 5-1 wider und sind konkret:

- Schritt 1) Anforderungsanalyse
- Schritt 2) Stakeholderanalyse
- Schritt 3) Ermittlung der relevanten Informationsobjekte
- Schritt 4) Aufzeigen der hardwareseitigen Durchgängigkeit
- Schritt 5) Lokalisierung der Merkmalquelle
- Schritt 6) Ermittlung der Adapterstrategie
- Schritt 7) Durchführung einer Wirtschaftlichkeitsanalyse
- Schritt 8) Definition einer Datenstruktur
- Schritt 9) Umsetzung der Adapterstrategie
- Schritt 10) Bereitstellung der Informationen für die Applikation
- Schritt 11) Erstellung einer Applikation

Im Hinblick auf die sozialen Aspekte der Industrie 4.0 dient die Methodik zur Überwindung der Kommunikationshürden innerhalb eines interdisziplinären Teams. Das wird erreicht, indem das Gesamtproblem in kleinere Teilprobleme zerlegt wird, die von den jeweiligen Disziplinexperten erarbeitet werden können (starke Kapselung). Die erreichten Teilziele werden in den nachfolgenden Schritten des Leitfadens als Anknüpfungspunkte der weiteren Disziplinen genutzt (lose Kopplung). Diese werden im Folgenden als Designinformationen bezeichnet. Parallel wird das Verständnis der übergreifenden Punkte geschaffen. Das interdisziplinäre Team besteht aus Mitgliedern folgender Wissensdomänen:

- Prozessingenieure, die ein gesamtheitliches oder „teilweises“ Prozesswissen innehaben. Sie stellen Prozessinformationen bereit und formulieren Prozessinformationsbedarfe.
- Automatisierungstechniker, die das elektrotechnische Design kennen. Sie verarbeiten Designinformationen.
- Informatiker, die die Infrastruktur und Architektur der IT kennen. Sie verarbeiten Designinformationen.

- Datenanalysten, die mathematische Grundlagen für die Datenanalyse kennen. Sie entwickeln Datenanalysen zur Befriedigung der ermittelten Prozessinformationsbedarfe.

Diese Parteien bilden die Domänenexperten auf ihrem Gebiet, wissen meist aber gar nichts/wenig über die jeweils domänenfremden Inhalte. Für die gemeinsame Zielerfüllung ist es notwendig, dass sich diese Domänenexperten gegenseitig verstehen lernen und eindeutig klar wird, welche Designinformationen für die einzelnen Bereiche für die Zielerfüllung notwendig sind. Zudem ist nicht von einer vollumfänglichen Kooperationsfähigkeit und damit Informationsbereitstellung auszugehen, insbesondere der Offenlegung produktionsspezifischer Inhalte (Prozessinformationen). Dies beschreiben NOWACKI ET AL. im Rahmen der Betrachtung von positiven und negativen Motivationseinflüssen. Darüber formulieren die Autoren Handlungsempfehlungen zur Überwindung sozialer Hemmnisse in der technischen Lösungsentwicklung (vgl. Nowacki, Müller, Grossmann, & Lüder, 2023).

5.1 Anforderungsanalyse

Ein klassischer Startpunkt von Digitalisierungs- und Industrie-4.0-Projekten ist die Anfrage einer produktionsnahen Abteilung des Industriebetriebes (Fertigung, Qualitätssicherung, o.ä.) an die IT-, oder eine IT-verwandte, Abteilung. Die Ausgangslage bildet zumeist eine prozessorientierte Problematik, die nicht mit konventionellen Problemlösungsmethoden zu bewältigen ist (s. 2.4.4). Der Erstkontakt³³ entsteht demnach zwischen diesen beiden Parteien, die im späteren Verlauf des Leitfadens den Kern des interdisziplinären Teams (s. 5.2) erweitern. Die Kommunikationsbasis aller Parteien setzt ein gemeinsames Verständnis über den Betrachtungsgegenstand voraus. Das beinhaltet einerseits die allgemeinen Prozessinformationen (Anforderungskontext: Wie sieht der aktuelle Produktionsprozess aus?) als auch die Wissenslücken zum Produktionssystem (Informationsbedarf: Was ist das zu lösende Problem?). Diese beiden Ziele werden in dem ersten Schritt zur Anforderungsanalyse des Retrofit-Leitfadens erreicht.

5.1.1 Beschreibung des Anforderungskontext mithilfe der Systemmodellierung

Die Beschreibung des Anforderungskontextes dient den involvierten Parteien als eine gemeinsame Quelle und Dokumentation der kommunizierten Prozessinformationen. Die Dokumentation des Anforderungskontexts bildet den kleinsten gemeinsamen Nenner des

³³ Der Literatur von NOWACKI ET AL. kann eine Vorbereitung auf einen derartigen Erstkontakt entnommen werden (vgl. Nowacki, Müller, Grossmann, & Lüder, 2023).

kollektiven Prozesswissens innerhalb des interdisziplinären Teams. Daher muss die zu wählende Methode domänenübergreifend verständlich sein (vgl. Pohl & Rupp, 2011, S. 43-59).

In der Praxis ist die dokumentenzentrierte Vorgehensweise verbreitet. Eine Systembeschreibung erfolgt hier auf Basis natürlichsprachlich formulierter Texte zur Spezifikation von Sachverhalten. Eine derartige Form birgt verschiedene Nachteile, wie einen breiten Interpretationsspielraum, eine aufwendige Dokumentenpflege und nicht zuletzt eine mühselige Erfassbarkeit. Eine alternative Vorgehensweise bietet die modellbasierte Vorgehensweise des Model-Based Systems Engineering (MBSE). Dieser graphische Ansatz überwindet die Hürden der Dokumentenzentrierung, indem ein graphisches Systemmodell auf Basis einer Modellierungssprache, einem Softwarewerkzeug und einer Methode gebildet wird. Ein hinreichendes Systemmodell beschreibt den Produktionsprozess für jede Fachdomäne gleichermaßen lesbar und nachvollziehbar (vgl. Kaiser, 2014, S. 24-26) (vgl. VDI/VDE 2206:2021-11, S. 36f).

Zunächst ist also eine geeignete Vorgehensweise zur Systemmodellierung zu wählen, um den Produktionsprozess darzustellen. Es ist zu beachten, dass sowohl der Prozessablauf selbst, die technischen Elemente des mechatronischen Systems mit ihren Eigenschaften, als auch die Anforderungen in Form von Informationsbedarfen verpflichtend modellierbar sein müssen. Neben diesen Kriterien formuliert KARAKI weitere Benchmarkkriterien, anhand derer eine geeignete Vorgehensweise auszuwählen ist (s. Tab. 5-1).

Kriterium	Beschreibung
Strukturelle Modellierung	Die sozio-technischen Elemente eines Systems müssen inkl. ihrer inhärenten (Qualitäts-)Merkmale darstellbar sein.
Verhaltensmodellierung	Interaktionen zwischen den sozio-technischen Elementen eines Produktionssystems (z. B. den Informations-, Material- oder Energiefluss) müssen darstellbar sein.
Anforderungsmodellierung	Anforderungen müssen darstellbar sein.
Modularität	Die Dekompositions- und Strukturierungsebene eines Systems kann dargestellt werden.
Verständlichkeit	Beteiligte ohne Expertenwissen können das Modell leicht verstehen.
Erlernbarkeit	Beteiligte ohne Expertenwissen können die Modellbildung schnell erlernen und (autark) anwenden.

Tab. 5-1: Benchmarkkriterien zur Auswahl einer geeigneten Systemmodellierungsmethodik

Eigene Darstellung in Anlehnung an (vgl. Karaki, 2023)

Im Kontext der jeweiligen praktischen Anwendung ist eine individuelle Bewertung der Vorgehensweise vorzunehmen. Zwei mögliche Beispiele stellen die Systems Modeling

Language (SysML) und das Konzept zur Produkt-Prozess-Ressource (PPR)³⁴ dar (s. a. Hoffmann, et al., 2023).

Das Ziel dieses Schrittes ist eine geeignete Modellierungsmethodik auszuwählen und mithilfe dessen anschließend ein Systemmodell des betrachteten Produktionssystems mit folgenden Eigenschaften zu erstellen:

- Die Schritte des Produktionsprozesses.
- Die involvierten sozio-technischen Elemente des Produktionssystems in hinreichender Detailtiefe.

5.1.2 Ermittlung von Informationsbedarfen auf Basis prozessualer Wissenslücken

Die nachfolgend zu klärende Fragestellung im Rahmen der Anforderungsanalyse ist das Verständnis der spezifischen Problemstellung und die Ermittlung von Informationsbedarfen³⁵ an das Produktionssystem. Sie basiert auf dem Anforderungskontext (s. 5.1.1). Es ist darzulegen, welches Wissen in Bezug auf den Produktionsprozess fehlt. Dieser Informationsbedarf kann einmalig (Ermittlung eines Ursache-Wirkungs-Zusammenhangs) oder fortlaufend sein (bspw. in Form eines Monitorings).

Das angestrebte Ziel dieses Leitfadens ist eine prozessspezifische Datenanalyse. Daher liegt der Schluss nahe, ein Konzept der Anforderungsermittlung aus der Softwareentwicklung zu verwenden. In der agilen Softwareentwicklung ist häufig zu beobachten, dass auf die Verwendung von User Stories unter Verwendung von Use-Case-Schablonen zurückgegriffen wird. Sie werden nach folgendem Prinzip formuliert „*Als <Benutzerrolle> will ich <das Ziel> (, sodass <Grund für das Ziel>)*“ (Wirdemann, Ritscher, & Mainusch, 2022, S. 56). In dem Kontext dieses Textabschnittes handelt es sich bei der Formulierung des Informationsbedarfes im ersten Schritt jedoch nicht um die Entwicklung eines konkreten Teils einer Software, sondern um das Schaffen eines einheitlichen Verständnisses im interdisziplinären Team bzgl. des konkreten Informationsbedarfes an den Produktionsprozess selbst. User Stories entsprechen nicht der Domäne der Prozessingenieure, weshalb nur mit großer Mühe ausdrucksstarke User Stories in einer Zusammenarbeit entstehen können.

³⁴ Nach (VDI/VDE 3682 Blatt 1:2015-05)

³⁵ „Unter Informationsbedarf wird im allgemeinen die Art, Menge und Beschaffenheit von Informationen verstanden, die ein Individuum oder eine Gruppe zur Erfüllung einer Aufgabe benötigt“ (Krcmar, 2015, S. 122) in Anlehnung an (vgl. Picot, 1988, S. 236)

Im Rahmen der praktischen Untersuchungen zu dieser Dissertation wurden User Stories als mögliches Werkzeug zur Ermittlung des Informationsbedarfes in Betracht gezogen. Hierbei war es wichtig, dass Prozessingenieure eigenständig ihren Informationsbedarf in verbalisierter Form ausarbeiten. Vorab wurde das Konzept der User Stories ausdrücklich erklärt und anhand einiger Beispiele demonstriert. Ein beispielhaftes Ergebnis der alleinigen Ausarbeitung einer User Story war wie folgt:

„Ich, als Prozessingenieur in der Fertigung, möchte die Daten über eine Softwarelizenz auf einem Server speichern und diese mittels einer Datenanalyse nach jetzigen Analysemethoden auswerten und anzeigen können.“

Trotz vorheriger Erklärung und Unterstützung konnte keine konkrete User Story durch die Prozessingenieure verbalisiert werden, aus der ein Informationsbedarf an das Produktionssystem hervorgegangen wäre. Aus dem genannten Beispiel gehen zwei konkrete Probleme hervor:

1. Die alleinige Verbalisierung von Informationsbedarfen durch den Prozessingenieur ist nicht zielführend. Es wird eine andere Ermittlungstechnik benötigt, die eine hohe Aussagenqualität liefert und zugleich möglichst wenig Personalkapazität bindet.
2. Die Darstellungsmethode entspricht nicht der Domäne des Prozessingenieurs. Es ist zu beachten, dass die ursprüngliche Aussage des Prozessingenieurs dokumentiert ist und erst in einem nachfolgenden Schritt in software-technische Anforderungen übersetzt wird.

Die wissenschaftliche Auseinandersetzung von KARAKI hat beide Probleme betrachtet und folgende Ergebnisse geliefert. Bezüglich der Ermittlungstechnik (Teilproblem 1) wurden 1:1-Gespräche („Interviews“), Fragebögen („Questionnaires“), „Prototyping“, Beobachtung („Observation“) und Dokumentenanalyse („Document Analysis“) entsprechend der Faktoren gegeneinander bewertet:

- Informationsbeschaffung: Effektivität bei der Beschaffung von Informationen der Prozessingenieure.
- Zeit- und Budgetbeschränkungen: getätigte zeitliche und monetäre Aufwände für die Informationsbeschaffung
- Verfügbarkeit der Stakeholder: Erfordernis der Anwesenheit der Informationsbereitstellenden

- Durchführungsaufwand: personeller Aufwand bei der Durchführung der Ermittlungstechnik
- Vorbereitungsaufwand: personeller Aufwand für die Vorbereitung der Ermittlungstechnik durch den Informationsermittelnden

Hier kommt der Autor mittels eines gewichteten Summenmodells (engl. „Weighted Sum Model“, kurz WSM) zu der Empfehlung, dass 1:1-Gespräche den besten Nutzen-Aufwand-Quotienten ergeben (vgl. Karaki, 2023).

Bezüglich der Darstellungsmethode (Teilproblem 2) vergleicht KARAKI das „Joint Application Design“ (JAD), „Quality Function Deployment“ (QFD) und „Controlled requirements expression“ (CORE) als Alternative zu dem Konzept von User Stories. Relevante Bewertungsfaktoren für den Vergleich bilden die Möglichkeiten zur Ermittlung von Nutzerbedürfnissen, Übersetzung der Nutzerbedürfnisse in technische Anforderungen, Konkretisierung und Spezifizierung der Entwicklungsaufgabe und Handhabung der Anforderungen. Darüber hinaus wurden die Adaptierbarkeit, Stakeholderakzeptanz, Schwierigkeitsgrad und Schnelligkeit der Implementierung, Erlernbarkeit und Reifegrad der Methoden miteinander verglichen. Das Evaluationsergebnis von KARAKI spricht eine Empfehlung der Nutzung des QFD³⁶ aus³⁷ (vgl. Karaki, 2023). Das Ergebnis dieses Leitfadenschrittes ist die Ermittlung einer Vorgehensweise zur Anforderungserhebung um konkrete, verbalisierte Informationsbedarfe an das Produktionssystem aufzunehmen und zu dokumentieren. Diese aufgenommenen Informationsbedarfe können selbstverständlich im Verlaufe des Projektes stärker konkretisiert und in einem gewissen Maß erweitert werden. Die Befriedigung dieser prozessualen Wissenslücken ist das Ziel des gesamten Leitfadens.

Im Sinne der Übersichtlichkeit ist empfehlenswert, die in diesem Abschnitt ermittelten Informationsbedarfe mit dem Systemmodell aus Kapitel 5.1.1 an den entsprechenden Stellen zu verknüpfen. Dieser Empfehlung kann nur dann gefolgt werden, sofern das gewählte Modellierungskonzept dies zulässt.

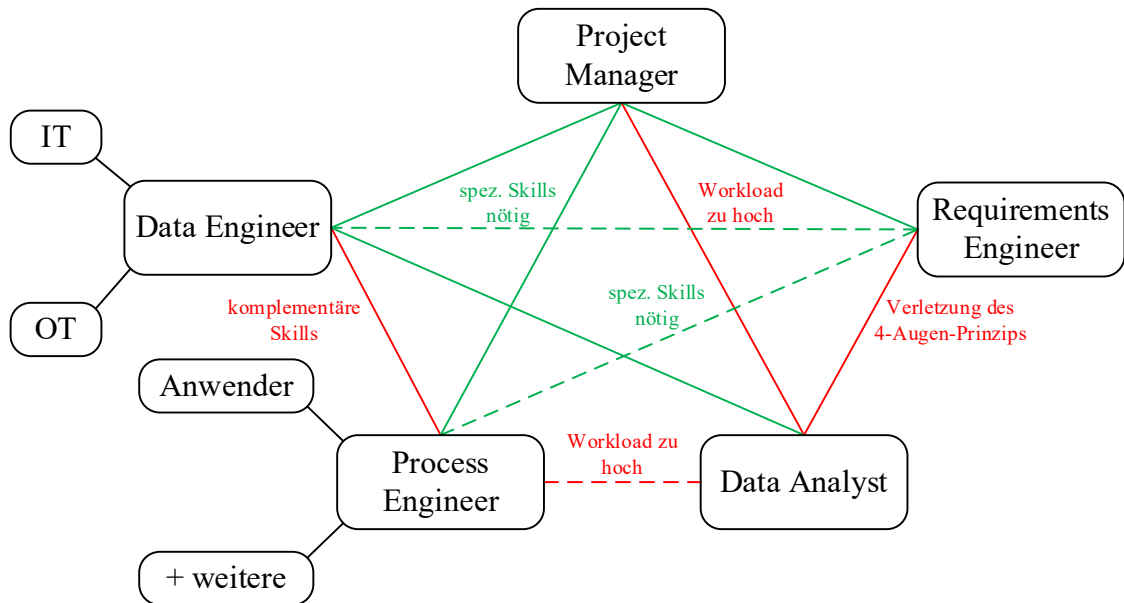
³⁶ Das QFD ist eine strukturierte Methode zur Anforderungserhebung, welche in diesem Kontext die prozessualen Informationsbedarfe der Prozessingenieure mittels einer Matrix in technische Designanforderungen übersetzt. Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass die technischen Anforderungen durch die parallele Dokumentation der prozessualen Anforderungen auch zu späteren Zeitpunkten nachvollziehbar sind.

³⁷ (s. a. Schockert & Herzwurm, 2015, S. 154-157)

5.2 Stakeholderanalyse

Der Erstkontakt mit anschließender Anforderungsanalyse hat den Betrachtungsgegenstand in seiner Gesamtheit näher konkretisiert. Es wurde ein hinreichendes Systemmodell aufgebaut, welches einem interdisziplinären Team als Kommunikationsgrundlage über den Prozesskontext und das Projektziel dient. Auf Basis dieser Konkretisierung sind relevante Stakeholder innerhalb und außerhalb des Industriebetriebes zur Erfüllung des Projektziels zu ermitteln. Entlang des Stufenmodells des Industrie 4.0-Entwicklungspfades konnten dafür fünf relevante Rollen identifiziert werden. Es entsteht ein Kernteam aus mindestens drei Personen, die die Zielerfüllung gleichermaßen verantworten. Die zu besetzenden Rollen und ihre Aufgaben werden in dem folgenden Abschnitt beschrieben.

Die Zielerreichung der Industrie 4.0 auf Basis eines automatisierten Produktionsprozesses erfordert die Besetzung von fünf zentralen Rollen. Allen voran steht der *Process Engineer*, dessen Aufgaben das Teilen des Prozesswissens mit dem interdisziplinären Team, die Formulierung fachlicher Fragestellungen und Abnahme der erarbeiteten Lösungen sind. Die Rolle des Prozessingenieurs bündelt die gesamte Interessentengruppe der zukünftigen Anwender der Lösung. Er ist somit der Vertreter der Domäne der Produktion. Damit ist eine weitere Aufgabe, die Stimmen der Interessenten zu vereinen und diese in dem Projekt zu platzieren. Der *Requirements Engineer* verantwortet das gesamte Anforderungsmanagement. Dieses beinhaltet die Anforderungsermittlung, -dokumentation, -verwaltung, -prüfung und -validierung mittels geeigneter Methoden und Tools (vgl. Pohl & Rupp, 2011, S. 12f). Die Rolle des *Data Engineers* verantwortet den Aufbau technischer OT-IT-Schnittstellen unter Verwendung domänenspezifischer Methoden, die Erarbeitung der Datenmodellierung und Bereitstellung der Daten in bestenfalls einer Single-Source-of-Truth für die Datenanalyse. Der Data Engineer vertritt die Domänen der technischen Akteure aus der OT und IT (Automatisierungstechnik und Business-IT) und kann spezifische Aufgaben an einzelne Vertreter weitergeben. Diese Rolle kann, neben der Interna des Industriebetriebes, externe Akteure von Zulieferern und Dienstleistern meinen. Der *Data Analyst* entwickelt auf Basis dieser bereitgestellten Daten die software-technische Lösung für die Erfüllung des Informationsbedarfes des Prozessingenieurs. Diese Rolle befindet sich zumeist in der Domäne der Informatik. Der *Project Manager* hat die Aufgabe der übergeordneten Projektkoordination inne. Somit scheint seine Domänenzugehörigkeit nicht von großer Relevanz. Es ist jedoch empfehlenswert, dass diese Person, neben den Fähigkeiten des Projektmanagements, ebenfalls über eine technische Kompetenz der OT- oder IT-Domäne verfügt. Dieser Leitfaden ist die Methodik, welcher der Project Manager folgt.



Legende:

- Zulässige Rollenpaarung - - - Eingeschränkt zulässige Rollenpaarung
- Unzulässige Rollenpaarung - - - Zulässige, aber nicht empfehlenswerte, Rollenpaarung

Abb. 5-2: Rollenaufteilung und Empfehlungen der Rollenpaarung

Eigene Darstellung

In der praktischen Anwendung dieses Leitfadens hat sich herausgestellt, dass ein Kernteam von mindestens drei Personen verschiedener Domänen benötigt wird, um alle benötigten Rollenkompetenzen abzubilden. Dabei ist eine Restriktion der zulässigen Rollenpaarung hervorgegangen, die in Abb. 5-2 dargestellt ist. Dabei wird unterschieden zwischen „zulässiger Rollenpaarung“, „eingeschränkt zulässiger Rollenpaarung“, „nicht empfehlenswerter Rollenpaarung“ und „unzulässiger Rollenpaarung“ mit angegebener Begründung. Grundsätzlich gilt, dass nicht jede Rolle von jeder Domäne besetzt werden kann. Einer der Gründe dafür ist, dass die Aufgaben zweier Rollen komplementär zueinander sind, sodass eine Person nicht den Experten in beiden Gebieten darstellen kann. Ein weiterer Faktor ist der zu tätigende Aufwand. In einem Industriebetrieb gibt es meistens mehrere, parallel ablaufende Projekte. Somit wird die Rollenpaarung in den Fällen verhindert, in denen der Workload des Einzelnen zu hoch wird, wodurch der Projektfortschritt zum Erliegen käme. Der Wirkungsbereich der genannten Rollen erstreckt sich wie in Abb. 5-3 gezeigt entlang des Stufenmodells des Industrie 4.0-Entwicklungspfades.

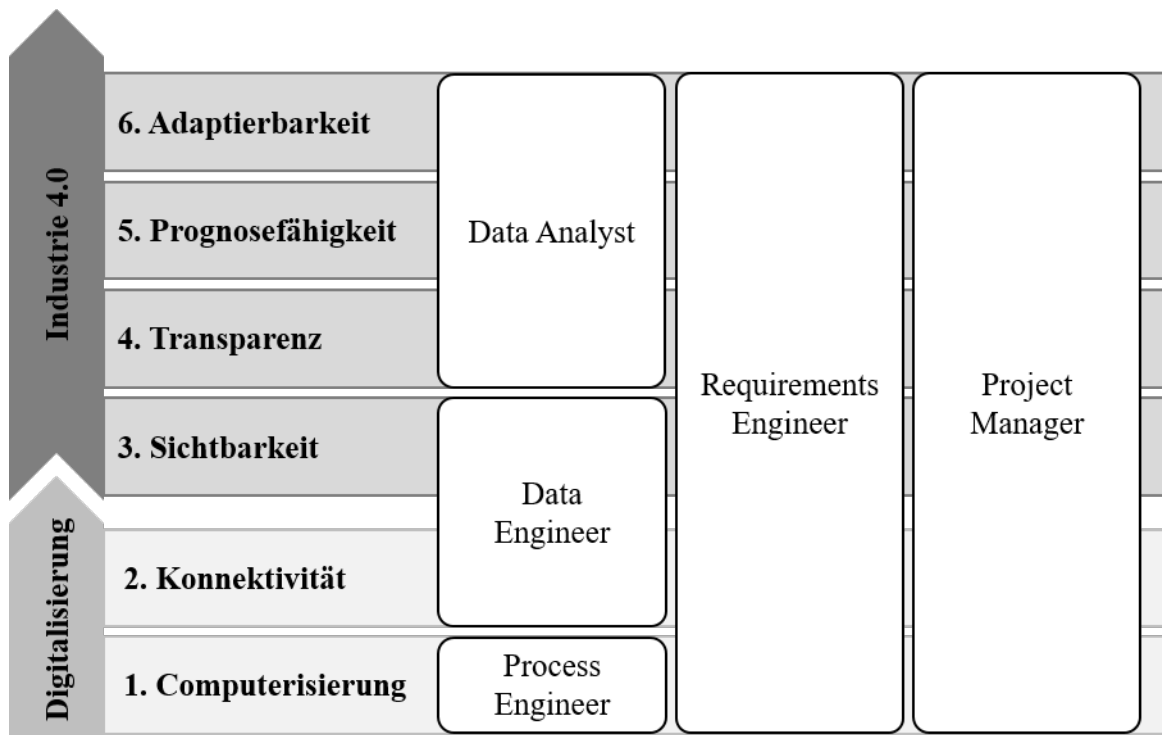


Abb. 5-3: Wirkungsbereiche der identifizierten Rollen entlang der Industrie 4.0-Reifegradstufen

Eigene Darstellung auf Basis von (vgl. Schuh, Anderl, Dumitrescu, Krüger, & ten Hompel, 2020a, S. 18)

Aus Sicht des Projektmanagers kann es sinnvoll sein, eine Einschätzung der Experten einzuholen und die Ermittlung der positiven wie auch negativen Motivationen der involvierten Personen vorzunehmen. Dies ist ein sozialer Aspekt auf den NOWACKI ET AL. näher eingehen (vgl. Nowacki, Müller, Grossmann, & Lüder, 2023).

5.3 Ermittlung der relevanten Informationsobjekte

Der grundlegende Modellierungsprozess relevanter Datenpunkte basiert auf den kommunizierten Informationsbedarfen, welche aus Kapitel 5.1.2 hervorgehen. In den meisten Fällen scheint es den Prozessingenieuren eine immense Hürde, die konkret zu gewinnenden Datenpunkte des Retrofittings zu benennen. Diese Hilflosigkeit führt in der Regel zu einer Übererfüllung der Datengewinnung, da mehr Datenpunkte gesammelt werden, als benötigt. Ungenutzte Daten verschwenden nicht nur Speicherplatz, die Gewinnung belastet auch unnötigerweise die laufenden Automatisierungsvorgänge und Netzwerkinfrastruktur. Der folgende Abschnitt soll Abhilfe für die Problematik der Identifikation konkreter Datenpunkte schaffen.

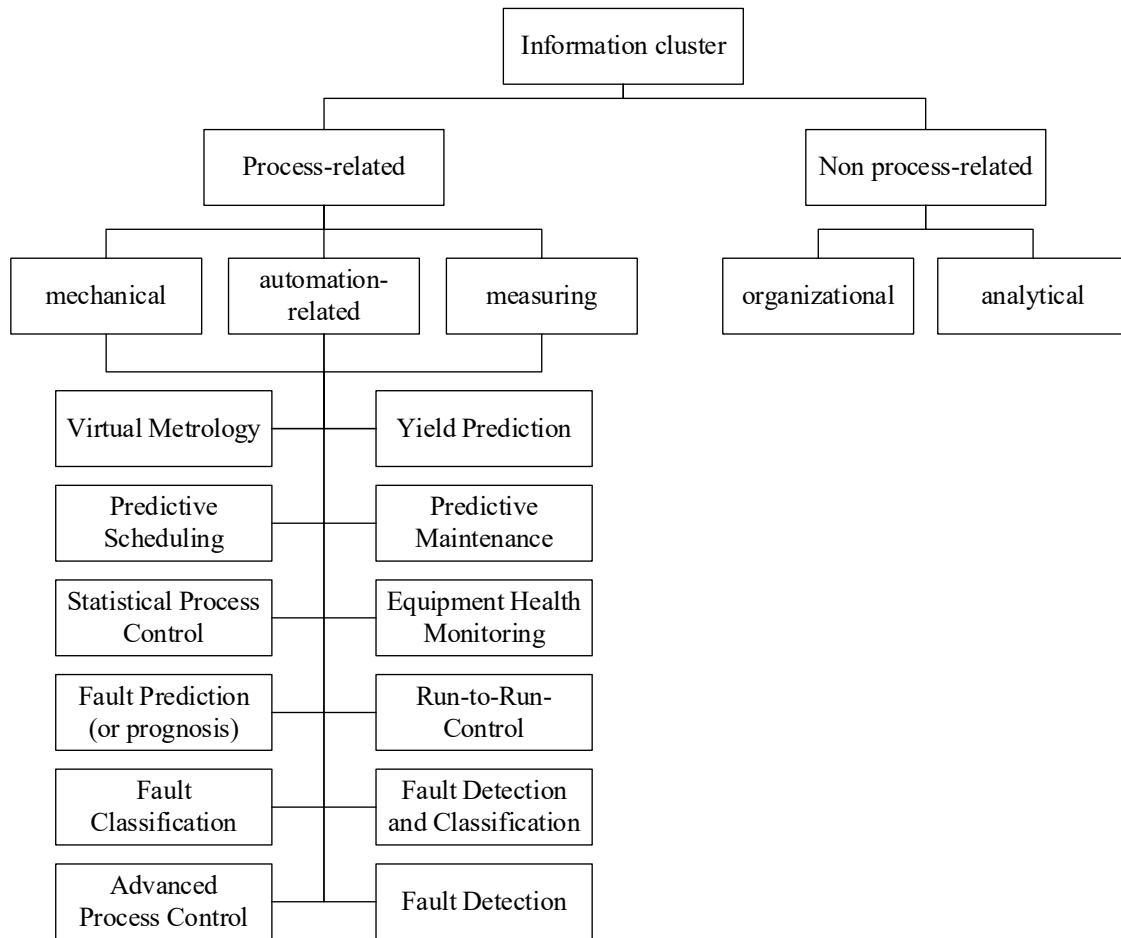


Abb. 5-4: Entscheidungsbaum für die Klassifikation in Informationsclustern

Eigene Darstellung in Anlehnung an (vgl. Nowacki, Müller, Grossmann, & Lüder, 2023)

Aus der Anforderungsanalyse geht hervor, welches Asset (s. 4.1) betrachtet wird und welches die konkreten prozessorientierten Informationsbedarfe sind. In der Regel sind es mehrere Informationsbedarfe, die natürlichsprachlich in der Domäne der Fertigung (bspw. mittels des QFD) dokumentiert wurden. Die Erarbeitung in eine technische Übersetzung erfolgt, indem die aufgenommenen Informationsbedarfe entsprechend ihrer Aussagenlogik in Gruppen eingeordnet werden. Diese Gruppen, die sogenannten Informationscluster, sind in Abb. 5-4 dargestellt.

Auf oberster Ebene können Informationscluster prozessbezogen oder nicht prozessbezogen sein. Prozessbezogene Cluster sind zum Beispiel mechanischer, automatisierungsbezogener oder messtechnischer Natur. Nicht prozessbezogene Cluster können organisatorischer oder analytischer Natur sein. Eine weitere Untergliederung erfolgt durch die Implementierung von Fähigkeiten. Die Literatur von WINKLER ET AL. sowie MOYNE ET AL. liefert hierfür einen geeigneten Ansatz. In ihrer Studie, die auf einer Umfrage basiert, geben sie verschiedene Fähigkeiten an, die mit den Herausforderungen von Big Data in der intelligenten Fertigung zusammenhängen. (vgl. Winkler, Korobeinykov, Novák, Lüder, & Biffl, 2021) (vgl. Moyne

& Iskandar, 2017). Die Definition der Cluster kann Anhang A entnommen werden. Ähnliche Aussagen aus der Anforderungsanalyse werden letztlich in gleichen Informationsclustern widergespiegelt.

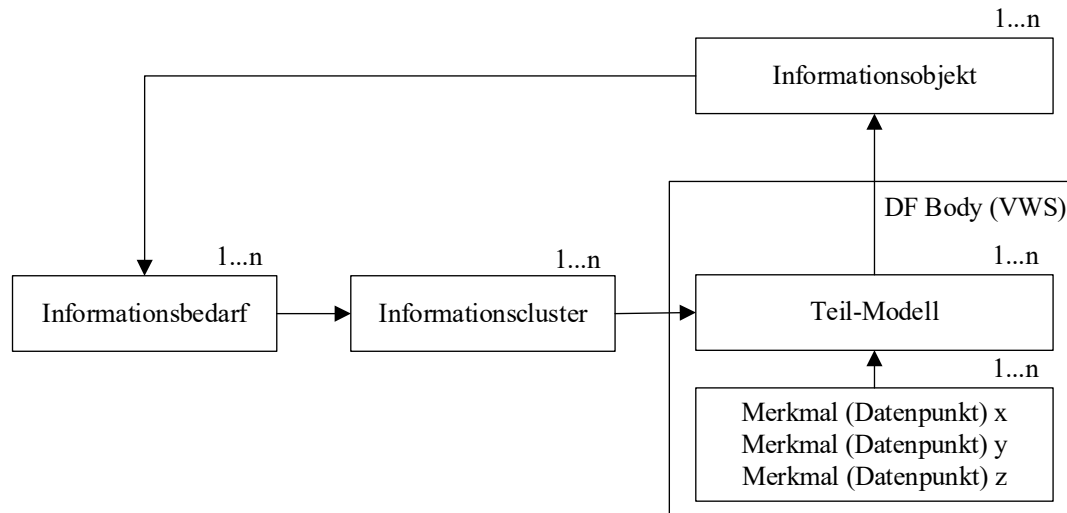


Abb. 5-5: Modellierungsprozess der Verwaltungsschalen-Teilmodelle

Eigene Darstellung in Anlehnung an (vgl. Nowacki, Müller, Grossmann, & Lüder, 2023)

Die Überführung der Informationsbedarfe in Informationscluster ermöglicht die Erstellung einzelner Teilmodelle entsprechend der Verwaltungsschale (s. Abb. 5-5). Gemäß der Definition zur Verwaltungsschale benötigt es konkrete Merkmale, um die Teilmodelle zu befüllen (vgl. DIN SPEC 91345:2016-04). Gemeint sind damit die charakterisierenden Datenpunkte. Aus den Teilmodellen mit ihren Merkmalen können in einer Applikation Informationsobjekte erstellt werden, welche letztendlich den Informationsbedarf der Prozessingenieure erfüllen.

5.4 Aufzeigen der hardwareseitigen Durchgängigkeit

Aus Gründen der IT-Sicherheit sind in Industriebetrieben in der Regel Schutzkonzepte, wie u.a. die Netzwerksegmentierung, realisiert. Um die in Kapitel 5.3 identifizierten Datenpunkte für Datenanalysen bereitzustellen, ist es notwendig, die betriebsinternen Schutzkonzepte zu analysieren und eine Datenverbindung im Rahmen der vorgegebenen Regeln aufzubauen. Dieser Abschnitt beschreibt, wie man die bestehende IT-Netzwerkarchitektur visualisiert, um das Ziel der Datenbereitstellung entsprechend der betriebsinternen IT-Sicherheitsregularien realisieren zu können.

Ein klassisches Schutzkonzept ist die Netzwerksegmentierung. Diese ist in der IEC 62443-2-1:2010 beschrieben und wird im englischsprachigen Raum als „zones and conduits“

bezeichnet. In den entsprechenden Zonen werden OT- und IT-Assets verortet, die den gleichen Sicherheitsstufen (engl. „security levels“) entsprechen oder gleiche Funktionalitäten erfüllen. Den Übergang zwischen diesen Zonen bilden Kanäle (engl. „conduits“), die der Kommunikation zwischen den Zonen dienen. Mittels dieser Kommunikationskanäle wird ein Datenaustausch unter Berücksichtigung der Sicherheitsanforderungen ermöglicht. Eine Restriktion dieser Kommunikation und eine Kontrolle der Kanäle erfolgt bspw. über Firewalls, Router und Switche (IEC 62443-2-1:2010, A.3.3.4.2).

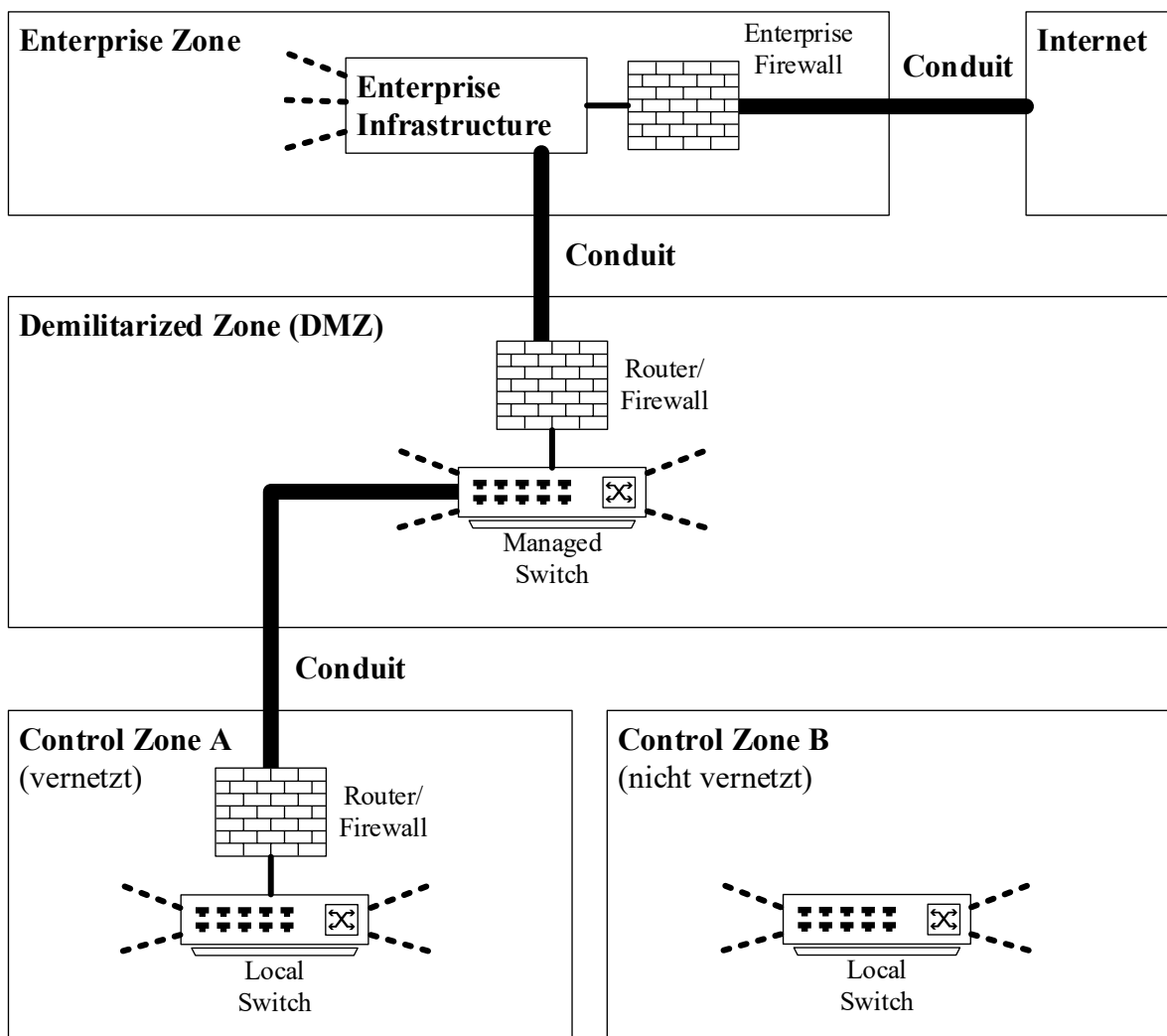


Abb. 5-6: Beispielhafte OT-IT-Architektur mit Netzwerksegmentierung

Eigene Darstellung in Anlehnung an (vgl. IEC 62443-2-1:2010, S. 90)

Ein Beispiel für solch eine Netzwerksegmentierung ist in Abb. 5-6 sehen. Gemäß IEC 62443-2-1:2010 ist die unterste Ebene die *Control Zone*, welche den größten Schutzanforderungen entspricht. Hier können sich bspw. die automatisierungstechnischen Produktionssystemkomponenten befinden. Standardmäßig ist die Regelung der Conduits,

jegliche Kommunikation zu verweigern („Zero-Trust-Prinzip“) und diese nur in begründeten Fällen zuzulassen, wenn ein kritischer Geschäftsbedarf besteht. Eine starke Restriktion der möglichen Verbindung erfolgt über die Freischaltung der konkreten Kommunikationskanäle mittels Angabe der Quell-IP, des genutzten Ports und der Ziel-IP. Das Vorhandensein derartiger Kommunikationskanäle wird im Rahmen dieser Arbeit als „vernetzt“ bezeichnet. Die *Demilitarized Zone (DMZ)* ist eine zusätzliche Möglichkeit der Risikominderung in der Verbindung zwischen der Control Zone mit hoher Sicherheitsstufe und der Enterprise Zone mit niedriger Sicherheitsstufe. Beispielsweise können Daten und Informationen aus den Produktionssystemen in der DMZ in vorverarbeiteter Form für die Nutzung in der Enterprise Zone verfügbar gemacht werden. Damit werden die auf die Control Zone notwendigen Zugriffe auf ein Minimum reduziert. Die *Enterprise Zone* dient bspw. den üblichen Office-Tätigkeiten und ermöglicht den Angestellten den Zugang zum Internet (vgl. IEC 62443-2-1:2010).

Es können Fälle auftreten, in welchen die technischen Komponenten einer Control Zone keine Verbindung in die DMZ haben. Dies tritt bspw. bei der Implementierung spezieller Systeme auf, die zwingend für den Produktionsprozess benötigt werden, allerdings nicht die Sicherheitsanforderungen des Betriebes erfüllen. Diese fehlenden Kommunikationskanäle werden im Rahmen dieser Arbeit als „nicht vernetzt“ bezeichnet.

In diesem Schritt des Leitfadens sind nun mehrere Designinformationen zu ermitteln:

- Wie sieht das konkrete Netzwerkzonenkonzept des eigenen Industriebetriebes aus?
- Welches sind die Regeln für die jeweiligen Netzwerkzonen und ihre Kommunikationsübergänge?
- In welcher Zone befinden sich die automatisierungstechnischen Komponenten des betrachteten Produktionssystems?
- In welcher Zone befindet sich die Datensenke (Datenanalyseplattform), in der die software-technische Lösung entwickelt wird?

Aus diesen Informationen wird die spezifische Netzwerkarchitektur des Produktionssystems visualisiert. Eine Abbildung ähnlich der oben gezeigten ist das Ergebnis dieses Kapitels.

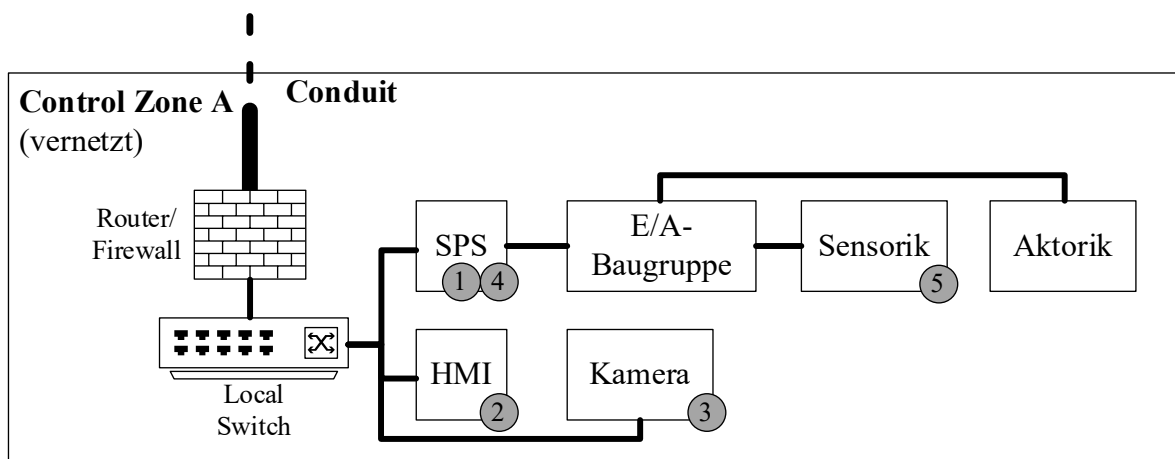
5.5 Lokalisierung der Merkmalquelle

Ob die erstellte Netzwerkarchitektur (s. Kapitel 5.4) hinreichend genau ist und somit alle relevanten Elemente abgebildet sind, ergibt sich durch die Lokalisierung der

Merkmalquellen. In Kapitel 5.3 wurden die konkreten Datenpunkte identifiziert, die zur Erfüllung der Informationsbedarfe benötigt werden. In diesem Kapitel werden die exakten Datenquellen in der Netzwerkarchitektur und ihre Charakteristika ermittelt.

Bei den betrachteten Datenpunkten kann es sich um verschiedene Arten von Daten handeln, wie bspw.:

- Maschinendaten: alle Daten, die eine Maschine selbst betreffen. Daten über den aktuellen Zustand einer Maschine (Alarmer, Störungsmeldungen, etc.).
- Betriebsdaten: alle Daten, die den Betrieb einer Maschine widerspiegeln. Das können z. B. Stückzahlen, Taktzeiten, ggf. auch der Energieverbrauch sein (Energiedaten könnten auch als eigener Punkt gesehen werden).
- Qualitätsdaten: alle Daten, die die Qualität des gefertigten Produktes widerspiegeln. Diese können bspw. skalare Werte der geometrischen Maße aber auch Bilder sein.
- Prozessdaten: bspw. die Ausgangsparameter der speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS), um Aktoren anzutreiben, wie z.B. Drehzahl, Vorschub, aber auch elektrische Werte, wie Spannung oder Stromstärke.
- Umgebungsdaten: Daten, die die ökologische Systemumwelt, bspw. über Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Staubbelastung, etc. beschreiben.



Legende:

- ① Maschinendaten ② Betriebsdaten ③ Qualitätsdaten ④ Prozessdaten ⑤ Umgebungsdaten

Abb. 5-7: Lokalisierung von Datenquellen in der OT-IT-Netzwerkarchitektur

Eigene Darstellung in Anlehnung an (vgl. IEC 62443-2-1:2010, S. 90)

Die Einordnung der notwendigen Datenpunkte in die beschriebenen Kategorien kann bei der Lokalisierung ihrer Datenquelle helfen (s. Abb. 5-7). Sind die Datenquellen identifiziert, ist es im Hinblick auf die Datengewinnung notwendig, sowohl die genaue Herstellerbezeichnung der verbauten Geräte, als auch die Hardware- & Firmwareversionen sowie die IP-Adresse in der Netzwerkarchitektur zu dokumentieren. Dabei ist es nicht ausreichend, nur das Gerät zu identifizieren. Hinsichtlich der Datenpunkte in einer SPS ist es von notwendiger Relevanz, den exakten Datenbaustein zu identifizieren. Hierzu ist es von großer Bedeutung, die Unterstützung eines OT-Experten anzufragen, der die Programmierung bestenfalls selbst vorgenommen hat oder zumindest die betriebsinternen Programmierstandards kennt.

Ein weiterer Punkt, der verpflichtend zu berücksichtigen ist, ist die Befüllung des Verwaltungsschalen-Headers. Damit die aufgenommenen Merkmale mittels der Datenpunkte einer Produktinstanz eindeutig zugeordnet werden können, ist eine Identifikation³⁸ der Produkte zu schaffen. Industriebetriebe behelfen sich typischerweise mit Lösungen wie Data Matrix Codes (DMC), Radio-Frequency Identification (RFID) oder ähnlichen.

Nach Abschluss dieses Kapitels ist für jeden Datenpunkt die konkrete Datenquelle bekannt. Gegebenenfalls wurde die Netzwerkarchitektur aus Kapitel 5.4 modifiziert und weist nun einen höheren Detaillierungsgrad auf.

5.6 Ermittlung der Adaptersstrategie

Die erstellte Netzwerkarchitektur zeigt die klaren Startpunkte (Datenquellen) und das Ziel (Datensenke) für die Datenbereitstellung auf. Die dokumentierten Designinformationen zu den Datenquellen und der Netzwerkarchitektur werden in diesem Schritt des Leitfadens genutzt, um entsprechend der technischen Voraussetzungen und betrieblichen IT-Sicherheitsanforderungen, einen geeigneten Adapter auszuwählen, um die Datenbereitstellung in der Praxis zu realisieren.

Die Adapterauswahl erfolgt anhand notwendiger Designinformationen (Herstellerbezeichnung, Hardware- und Firmwareversion), die in Kapitel 5.5 erarbeitet wurden. Auf Basis dieser Informationen kann ermittelt werden, ob die Datenquelle selbst schon über eine Industrie 4.0-fähige Schnittstelle verfügt (DC). Ist eine DC nicht vorhanden,

³⁸ Für eine globale Identifikation (s. a. Plattform Industrie 4.0, 2020, S. 19) (s. a. DIN EN IEC 62832-1:2022-05, S. 19).

ist es empfehlenswert, über den Gerätehersteller zu ermitteln, ob die Kommunikationsfähigkeit mittels eines Updates hergestellt werden kann (OTU). Sind sowohl DC als auch OTU nicht möglich, bieten mittlerweile diverse Anbieter Adapterlösungen mit aktivem oder passivem Gateway an. Eine Liste beispielhafter Anbieter führen AL-BADRI ET AL. auf (vgl. Al-Badri, Al-Scheikly, & Binder, 2022, S. 52-55). Die erste grobe Vorauswahl wirksamer Adapter wird auf Basis ihrer Kompatibilität zur Datenquelle getroffen. Die Netzwerkarchitektur bildet die Grundlage für die technische Durchsprache mit den vorausgewählten Anbietern. In der Vorbereitung und bei der Durchsprache selbst sind die verantwortlichen Personen der IT-Sicherheitsanforderungen bzgl. der Control Zone und DMZ einzubeziehen.

Vorbereitete Benchmarkkriterien helfen zusätzlich beim konkreten Vergleich der getroffenen Adaptervorauswahl. Beispielhafte Kriterien sind in Anhang B aufgeführt und in den Kategorien OT-, IT-, IT-Sicherheits- und User-orientiert untergliedert. Für die einzelnen Kriterien können auch Mindestanforderungen, Angaben zu Betriebsstandards, eine Kritikalität oder Priorisierung mitdokumentiert werden.

Die in Gesprächen mit den Adapteranbietern ermittelten technischen Angaben auf Basis des Benchmarks sollten durch ein technisches Team in einem Proof-of-Concept überprüft werden. Mit der Durchführung dieses Leitfadenschrittes ist das Resultat mindestens ein Adapter, der für eine Implementierung in Frage kommt. Sollte keine der Lösungen technisch zielführend sein, bieten einige der genannten Anbieter ebenfalls die Möglichkeit der Neuentwicklung von Adaptern an.

5.7 Durchführung einer Wirtschaftlichkeitsanalyse

Mit der Bewertung der wirtschaftlichen Rentabilität einer Retrofitgesamtlösung wird über die praktische Umsetzung der zuvor geplanten Inhalte entschieden. Dabei dürfen die monetären wie auch personellen Aufwände den Nutzen der Lösung nicht übersteigen. Das folgende Kapitel gibt Hinweise, welche Arten von Nutzen und Kosten auftreten können.

Hinsichtlich der Quantifizierbarkeit kann „Nutzen“ nach BRUGGER in folgende drei Arten unterschieden werden:

- *Direkt monetär messbarer Nutzen* („tangible – hard benefits“), sind Nutzenpotentiale, die unmittelbar aus dem Investitionsvorhaben hervorgehen und mittels einer finanziellen Größe beziffert werden können. Geringere Kosten für Wartungen, Hardware, Lagermengen sind ausgewählte Beispiele für diese Kategorie.

- *Indirekt monetär messbarer Nutzen* („tangible – soft benefits“), sind Nutzenpotentiale, die indirekt aus der Investition hervorgehen, wodurch der monetäre Mehrwert nicht offensichtlich ist. Zu dieser Kategorie gehören bspw. höhere Mitarbeiterproduktivität und höhere Kundenzufriedenheit.
- *Nicht monetär messbarer Nutzen* („intangible benefits“), sind Nutzenpotentiale, die auf Basis subjektiver Einschätzung und Annahmen beruhen. Darunter fallen bspw. die Strategiekonformität, Imagegewinn, höhere Mitarbeitermoral, etc. (vgl. Brugger, 2009, S. 87f).

Für die Bewertung des erwarteten, tangiblen Nutzens schlägt der VDMA die Gegenüberstellung verschiedener Kostenarten mit und ohne umgesetzte Retrofit-Lösung vor (vgl. VDMA Forum Industrie 4.0, 2020) (s. Tab. 5-2).

Kostenart	Kosten ohne Retrofit	Kosten mit Retrofit
Abschreibungen		
Medien (Storm, Druckluft, Klimatisierung)		
Elektrische Lastspitzen		
Geplante Wartungen (Preventive Maintenance)		
Ungeplante Anlagenstillstände		
Verringerte Bearbeitungsgeschwindigkeit		
Kurzfristige Störungen und Unterbrechungen sowie deren Behebung		
Ausschuss		
Lagerhaltungskosten für Ersatzteile		
Ineffizienter Anlagenbetrieb		
Rückläufer aufgrund unzureichender Qualitätskontrolle		
Maschinenbelegplatz		
Wartezeiten (Material, Personal, Auftragspapiere)		
Dokumentation von Anlagenbetrieb und Qualitätskontrollen		
Lagerhaltungskosten (Roh- und Fertigwaren) und Fertigungslogistik		
Personal für Maschinenbeobachtung		

Tab. 5-2: Bewertungskriterien für die Einschätzung des tangiblen Nutzens von Retrofit-Lösungen

(VDMA Forum Industrie 4.0, 2020, S. 41)

Bei der Umsetzung von Retrofittings entstehen einmalige und ggf. auch laufende Kosten. Diese können bspw. folgende sein:

- Einmalige und laufende Kosten für Adapterhardware und -software (Lizenzen, Wartung, etc.)
- Einmalige und laufende Kosten für benötigte Umsysteme, wie bspw. Server und Datenbanken
- Kosten für die Inbetriebnahme der Adapterlösung

- Kosten für weitere Leistungen bspw. zur softwaretechnischen Anpassung der Datenquellen
- Kosten für weitere Hardware oder Software zur bspw. Einhaltung der betrieblichen IT-Sicherheitsanforderungen (z.B. Firewalls)
- Kosten oder personeller Aufwand für die Umsetzung der Datenanalyse
- Einmalige und laufende Kosten bzgl. der Datenanalyseplattform
- Kosten oder personeller Aufwand für das Projektmanagement
- Geschätzter personeller interner Aufwand für die Projektumsetzung (für die einzelnen Personen aus dem festgelegten Kernteam in Kapitel 5.2)

Aus der Gegenüberstellung des erwarteten Nutzens und den anfallenden Kosten für die Umsetzung der Retrofitting-Maßnahmen geht hervor, ob diese einen wirtschaftlichen Vorteil erbringen. An dieser Stelle des Leitfadens fällt die Entscheidung, ob und welche Adapterstrategie umgesetzt wird.

5.8 Definition einer Datenstruktur

Ein Konzept zur Lagerung bzw. Speicherung prozessbezogener Informationen ist das Data Warehouse oder ein Data Lake. Das Data Warehouse wird einerseits genutzt, um Informationen anforderungsgerecht zu verwalten, andererseits dient es auch dazu, die Informationen für Datenanalyseverfahren bereitzustellen. Gemäß der Definition von INMON zeichnet sich ein Data Warehouse durch vier Hauptmerkmale aus: *„A data warehouse is a subject-oriented, integrated, nonvolatile, time-variant collection of data in support of management’s decision.“* (Inmon, 2002, S. 31).

Das erste Merkmal (“subject-oriented”) meint nach KRCMAR den Bezug der aufgenommenen Daten zu einem konkreten Sachverhalt (bspw. einem Geschäftsprozess). Daten können in diesem Konzept mehreren Datenquellen entspringen, wie auch Kapitel 5.5 gezeigt hat. Das zweite Merkmal („integrated“) beschreibt die Vereinheitlichung und Integration von Daten aus verschiedenen Quellen in ein Gesamtkonzept. Hier werden auch Aspekte wie die einheitliche Bezeichnung berücksichtigt. Das dritte Merkmal („non-volatile“) meint die bedingte Unveränderlichkeit der gespeicherten Daten. Sie können mittels Einfügeoperationen zwar ergänzt, allerdings nur bedingt verändert werden. Eine Ausnahme bilden bspw. Korrekturmaßnahmen die Richtigkeit der Daten betreffend. Das

letzte Merkmal („time-variant“) beschreibt die Herstellung eines Zeitbezugs der Daten, um bspw. Trendanalysen zur ermöglichen (vgl. Krcmar, 2015, S. 150f).

Basierend auf den ermittelten Informationsobjekten in Kapitel 5.3 ist für das Data Warehouse ein Modell zur einheitlichen Strukturierung der Daten zu entwickeln. Hierzu kann beispielhaft auf den Standard des OPC UA Information Model und der zugehörigen Spezifikationen zurückgegriffen werden, der für die Industrie 4.0 geschaffen wurde (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2022, S. 147). Ziel ist es nun, aus den allgemeinen Datenobjekten die Eigenschaften herauszuarbeiten und auf bereits bestehende Standards zurückzugreifen. Auf diese Weise entsteht ein Informationsmodell, das auf den Anforderungen der konkreten Anwendungsfälle sowie auf Vorgaben aus Industrie und Wissenschaft aufbaut.

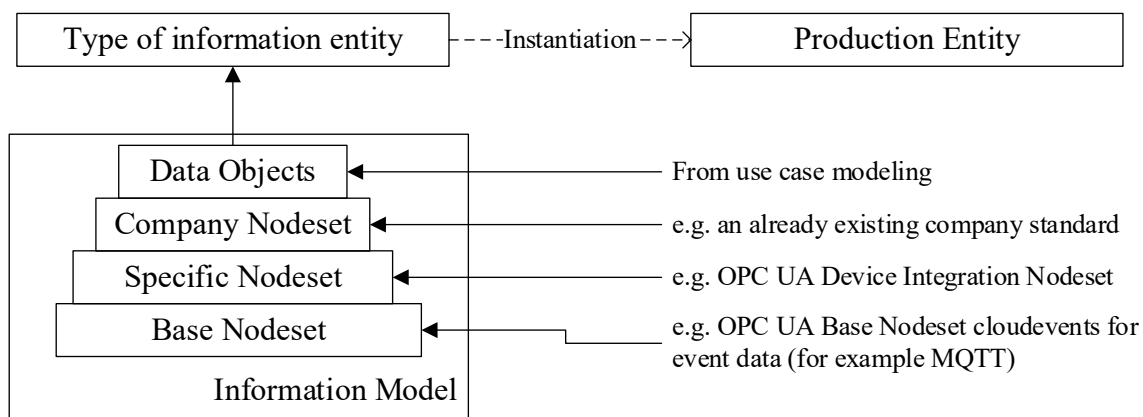


Abb. 5-8: Möglicher pyramidaler Aufbau eines Informationsmodells

Eigene Darstellung in Anlehnung an (vgl. Nowacki, Müller, Grossmann, & Lüder, 2023)

Eine mögliche Struktur eines solchen Modells könnte wie in Abb. 5-8 aufgebaut werden. In der Abbildung werden bereits bestehende Standards aus Industrie, Wissenschaft oder dem Unternehmen als Grundlage verwendet. Auf diese Weise gibt es bereits vorhandene Objekte oder Strukturen, auf die bereits zurückgegriffen werden kann. Unter Zuhilfenahme dieser modularen Strukturen entstehen generische Modelle, die in der Zukunft über ein Projekt hinaus wiederverwendet werden können. Darüber hinaus werden neue Lösungsansätze aus Industrieverbänden einbezogen (vgl. Nowacki, Müller, Grossmann, & Lüder, 2023).

Das *Base Nodeset* bietet einen ersten Standard und gibt erste Einblicke in die später verwendete Technologie. Das *Specific Nodeset* liefert zusätzliche Objekte und Strukturen für die betrachtete Domäne. Es ist möglich, dass es auch bereits bestehende, modellierte Standards im Unternehmen gibt, die im *Company Nodeset* dargestellt werden. All diese Nodesets bilden die Grundlage für die Datenobjekte aus der Anwendungsfallmodellierung (vgl. Nowacki, Müller, Grossmann, & Lüder, 2023).

Nähere Informationen zu dem OPC UA Information Model können der OPC UA SPEZIFIKATION PART 5 entnommen werden (vgl. OPC Foundation, 2022)³⁹. Das OPC UA Information Model bildet zwar einen Standard in der „neuen Welt“, dieses kann in manchen Fällen des Retrofittings jedoch nur bedingt weiterhelfen. Meistens wurde bereits betriebseigene und historisch bedingte Lösungen entwickelt, auf die aufzusetzen ist.

5.9 Umsetzung der Adapterstrategie

Mit diesem Kapitel sind alle technischen Designinformationen vorhanden, um die praktische Umsetzung der zuvor erarbeiteten Adaptierungsstrategie einzuleiten.

Für den Bereich der operativen Technologien (OT) bedeutet dies die Bestellung der notwendigen Hardwarekomponenten. Das beinhaltet ggf. die Bestellung der ausgewählten Adapterhardware, zusätzliche Firewalls, Switches, etc. Die Installation und Inbetriebnahme der Komponenten zur Herstellung der Konnektivität sind durchzuführen. Des Weiteren ist zu prüfen, ob weitere Modifikationen der bestehenden Softwarekomponenten relevant sind.

Im Kontext der IT ist die benötigte IT-Infrastruktur bereitzustellen. Das beinhaltet bspw. die Einrichtung von Zugriffsberechtigungen, Firewall-Freischaltungen, etc. unter Berücksichtigung der IT-Sicherheitsanforderungen. Zusätzlich ist die Zusammenführung der heterogenen Datenquellen in ein zentrales Data Warehouse relevant und die Einrichtung von Löschkzyklen für die Daten.

5.10 Bereitstellung der Informationen für die Applikation

Die Bereitstellung der Informationen für die Applikation orientiert sich hauptsächlich an den unterstützten Kommunikationsprotokollen. In Hinblick auf die Industrie 4.0 in Deutschland hat das BSI die Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA) als Datenkonnektivitätsstandard identifiziert (vgl. BSI, Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, 2016). Dies ist der Grund für die starke Verbreitung von OPC UA im Kontext der Produktion. OPC UA ist ein Standard, der es technischen Komponenten ermöglicht, sich gegenseitig Befehle zu senden. Statt also Daten nur passiv zu versenden und anzunehmen, agieren technische Geräte aktiv auf die empfangenen Befehle (vgl. Kominek, 2017).

³⁹ (s. a. VDMA e. V., kein Datum)

Dieser Standard ist sowohl seitens der Automatisierungstechnik, als auch von den Informationssystemen nutzbar. Abhängig von der notwendigen Datengeschwindigkeit ist zu prüfen, welche Datenverbindungsmethode für den betrachteten Anwendungsfall benötigt wird. Besteht die Anforderung einer hochfrequenten Datenübertragung eignet sich die Datenverbindungsmethode Publish/Subscribe (Pub/Sub). Für niederfrequente Datenübertragung ist hingegen eine handshakebasierte Client/Server-Methode die richtige Wahl (vgl. Kominek, 2017).

Beide Datenverbindungsmethoden basieren auf dem OPC UA Information Model. Der Vergleich der beiden Methoden, sowie die nähere Definition der Pub/Sub-Architektur kann in der OPC UA SPEZIFIKATION PART 14 nachgeschlagen werden (vgl. OPC Foundation, 2018).

5.11 Erstellung einer Applikation

Der eingangs definierte Informationsbedarf (s. Kapitel 5.1.2) wird durch die Entwicklung einer Applikation zur statistischen Datenanalyse erreicht. Erkenntnisse aus der Datenanalyse können für eine Prozess- oder Qualitätsoptimierung, Prozessüberwachung, vorausschauende Szenarien, o.ä. genutzt werden. Ist eine Adaptierungsoption mit schreibendem Zugriff implementiert, kann das entstandene System eine automatische Anpassung der Steuerungsvariablen der Datenquelle vornehmen (Reifegradstufe 6: Adaptierbarkeit). Ist dieses nicht gewährleistet, müssen Erkenntnisse manuell durch die Fertigungsmitarbeiter übertragen werden, wodurch die Analyseerkenntnisse in einer verständlichen Form für die Zieldomäne aufbereitet sein müssen.

Die statistische Datenanalyse ist ein Feld in der sogenannten Data Science (vgl. Weihs & Ickstadt, 2019). Die Autoren übersetzen die Definition des „Data Science“-Begriffes nach CAO⁴⁰ folgendermaßen: *„Data Science besteht aus Statistik, Informatik und Datenverarbeitung zusammen mit Kommunikation, sozialer Einordnung und Management auf der Grundlage von Daten, Domänenwissen und datenorientiertem Denken.“* (Weihs & Ickstadt, 2019, S. 204). Das Ziel der Data Science ist gemäß dieser Definition also das Schaffen eines Unternehmensmehrwertes auf Basis von Daten.

⁴⁰ Originalzitat: *„From the disciplinary perspective, data science is a new interdisciplinary field that synthesizes and builds on statistics, informatics, computing, communication, management, and sociology to study data and its environments (including domains and other contextual aspects, such as organizational and social aspects) in order to transform data to insights and decisions by following a data-to-knowledge-to-wisdom thinking and methodology“* (Cao, 2017, S. 8)

Um dieses Ziel zu erreichen wurden diverse Vorgehensweisen entwickelt. Eine davon ist das Cross Industry Standard Process for Data Mining (CRISP-DM). CRISP-DM umfasst sechs Schritte, die in Abb. 5-9 dargestellt ist.

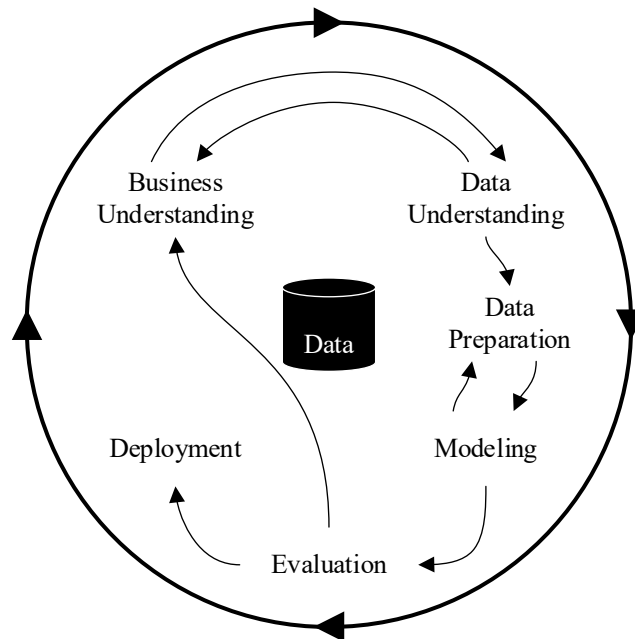


Abb. 5-9: CRISP-DM

Eigene Darstellung in Anlehnung an (vgl. Haneke, Trahasch, Zimmer, & Felden, 2019)

Die Schritte des Business Understanding (Fachliches Verständnis) (s. Kapitel 5.1), Data Understanding (Verständnis der Daten) (s. Kapitel 5.3), Data Preparation (Datenvorbereitung) (s. Kapitel 5.8) wurden in den vorigen Kapiteln erfüllt. Wie es in der Abbildung dargestellt ist, sind Iterationen und Schleifen zwischen den Schritten erlaubt und notwendig. Die ausstehenden Schritte sind das Modeling (die Modellierung) der Daten mithilfe von Datenanalysen, die Evaluation der ermittelten Ergebnisse durch den engen Abgleich mit dem fachlichen Verständnis und das letztendliche Deployment (die Implementierung), also Übertragung der Ergebnisse zur Nutzung im betrieblichen Alltag.

Im Rahmen der Modellierung können verschiedene Methoden der statistischen Datenanalyse verwendet werden. Eine Möglichkeit ist das Testen von Hypothesen, die auf prozessorientierten Erfahrungswerten basieren. Die fachlichen Hypothesen werden durch Domänenexperten (hier die Prozessingenieure) formuliert und mittels statistischer Tests durch den Datenanalysten bestätigt oder widerlegt. Eine beispielhafte Vorgehensweise zur Aufnahme fachlicher Hypothesen im Zusammenhang mit der PPR-Modellierung kann in der Arbeit von HOFFMANN ET AL. eingesehen werden (vgl. Hoffmann, et al., 2023)⁴¹.

⁴¹ (s. a. Kropatschek, et al., 2022)

Regressionsmethoden hingegen werden dazu genutzt, um unbekannte Merkmalszusammenhänge zu ermitteln. Weitere Datenanalysemethoden bilden Klassifikationsmethoden oder Zeitreihenanalysen für die Vorhersage von bestimmten Systemverhaltensweisen (vgl. Weihs & Ickstadt, 2019).

Die Evaluation der Analyseergebnisse dient der Überprüfung der Güte der ermittelten Zusammenhänge, die gemeinsam mit den Prozessingenieuren durchgeführt wird. Insbesondere prädiktive Datenanalysemethoden, also diejenigen Methoden zur Vorhersage eines Systemverhaltens auf Basis definierter Merkmale, führen nur bedingt zu der erwünschten Aussagekraft, wenn es sich um ein nicht-deterministisches System handelt (s. 2.4.2). Das abschließende Deployment umfasst die Erstellung von graphisch aufbereiteten Visualisierungen oder Berichten in Form von bspw. Dashboards für einen kontinuierlichen, datenbasierten Informationszugriff der Fertigungsmitarbeiter (vgl. Weihs & Ickstadt, 2019) (vgl. Haneke, Trahasch, Zimmer, & Felden, 2019, Kap. 7.1).

Rückblickend über alle durchgeführten Schrittfolgen des Leitfadens kann in diesem Schritt festgestellt werden, ob die Auswahl und Frequenz der Datenpunkte für das Vorhaben genügt. Verfeinerungen können über eine iterative Durchführung dieses Leitfadens erfolgen. Ist ein Durchstich von der OT hin zur IT mit dieser Vorgehensweise einmal durchgeführt, lässt sich der Datenpool ausgehend von dieser Basis durch Iteration weiter verfeinern und ausbauen. In der Abschlussbetrachtung des Projektes bietet sich eine erneute Wirtschaftlichkeitsprüfung an, um den tatsächlichen, ökonomischen Nutzen des Retrofittings festzustellen.

6 Prototypische Anwendung zur Methodvalidierung anhand eines praktischen Beispiels

Dieses Kapitel zeigt die prototypische Anwendung der in Kapitel 5 gezeigten Methodik anhand eines praktischen Beispiels aus der Elektromotorenfertigung. Das Ziel ist es dem Leser zu vermitteln, wie die einzelnen theoretischen Schritte bei der praktischen Umsetzung von Industrie 4.0 in der Fertigung helfen kann. Zusätzlich werden aus der Best Practice heraus zusätzliche Empfehlungen am Ende jedes Abschnitts formuliert.

Der Hintergrund des folgenden Beispiels ist ein reales Projekt zur praktischen Umsetzung von Industrie 4.0 in einem Produktionsprozess zur Herstellung des Stators, einer Komponente eines Elektromotors. Dieses Projekt besteht aus einer Vielzahl an Anforderungen und anvisierter Ziele. Das globale Ziel des Projektes ist die Steigerung der Handlungsfähigkeit der Fertigungsmitarbeiter auf Basis neuer Erkenntnisse hinsichtlich Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen und ein kontinuierliches, datenbasiertes Prozessmonitoring. Das folgende Beispiel bildet lediglich einen Ausschnitt des Gesamtprojektes zur Verdeutlichung der Methodenanwendung. Zwei weitere, skizzenhafte Beispiele können weiteren Quellen entnommen werden (s. a. Nowacki, Ritter, Lüder, & Behnert, 2021) (s. a. Nowacki, Müller, Grossmann, & Lüder, 2023).

6.1 Anforderungsanalyse

Das Ziel der Anforderungsanalyse ist das Schaffen eines gemeinsamen, domänenübergreifenden Verständnisses über den allgemeinen Produktionsprozess der Statorfertigung und die Ermittlung der konkreten Informationsbedarfe der Prozessingenieure an das Produktionssystem. Der fachliche Hintergrund der Anfrage für die datenbasierte Analyse des Fertigungsprozesses ist die Vermutung, dass unter Zuhilfenahme der Daten eine Senkung des Produktionsausschusses in der Statorfertigung erzielt werden kann. Diese Hypothese gilt es zu erarbeiten.

Der schematische Produktionsprozess ist in Abb. 6-1 dargestellt. Der Prozess beginnt mit dem lackierten Kupferdraht, welcher als Eingangsmaterial auf einer Kupferdrahtrolle angeliefert wird. Der Kupferdraht wird von der Rolle abgerollt, begradigt, partiell abisoliert, in mehreren Prozessschritten vorerst in zweidimensionaler (2D) und anschließend dreidimensionaler (3D) Ausrichtung gebogen. Die einzelnen, gebogenen Hairpins werden nacheinander zu einem Hairpinkorb vormontiert, die in ihrer Gesamtheit in ein Statorblechpaket gefügt werden. Die freistehenden Enden werden verbogen und auf eine einheitliche Höhe gekürzt. In einem abschließenden Prozessschritt werden die freien

Kupferenden miteinander oder mit Verschaltelementen verschweißt. Nach abschließender Harz imprägnierung werden die elektrischen Eigenschaften der Statoren vertestet und für den weiteren Zusammenbau zu einem Elektromotor als Ausgangsprodukt in den nächsten Montageschritt gegeben. Die geometrische Anordnung der einzelnen Hairpins kann nur gewährleistet werden, indem geometrisch unterschiedliche Hairpintypen definiert werden (vgl. Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen University, 2022).

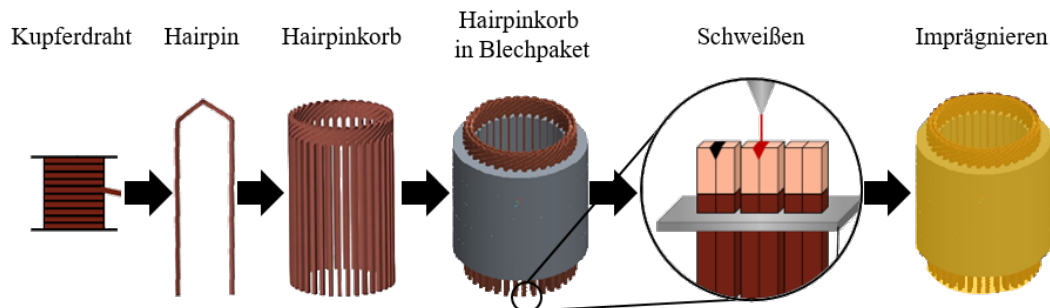


Abb. 6-1: Produktionsprozess eines Hairpinstators

Eigene Darstellung in Anlehnung an (vgl. Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen University, 2022) und (vgl. Riedel, et al., 2018)

Der erste Schritt besteht in der Modellierung des Produktionsprozesses. Die Betrachtung der Produktionsprozessmodellierung im Sinne der Industrie 4.0 und den genannten Benchmarkkriterien stellt KARAKI SysML und das Konzept der PPR gegenüber. In dem Betrachtungskontext geht aus der wissenschaftlichen Auseinandersetzung hervor, dass das PPR-Konzept zwei entscheidende Vorteile gegenüber SysML aufweist. Erstens lassen sich die relevanten Prozessinformationen eines Systemmodells in einem gesamtheitlichen PPR abbilden. Die Vielzahl der neun Diagrammtypen in SysML ermöglicht ein breites Anwendungsspektrum, führen in der hier gewählten Betrachtung allerdings zur Nutzung drei unterschiedlicher Diagrammtypen (Aktivitäts-, Block- und Anwendungsdiagramm), um denselben Inhalt darzustellen. Zweitens erzeugt das große Anwendungsspektrum und die Detailtiefe eine unnötige Einstiegshürde für unerfahrene Personen (vgl. Karaki, 2023).

Aus dieser Argumentation heraus wird im folgenden Text fortan das PPR-Konzept verfolgt, welches eine simple Vorgehensweise darstellt. Die konkrete Modellierungsmethodik ist in der VDI/VDE 3682 beschrieben, welche durch MEIXNER ET AL. um das Element „Skills“ erweitert wurde (vgl. VDI/VDE 3682 Blatt 1:2015-05) (vgl. Meixner, Musil, Lüder, Winkler, & Biffel, 2022). Die Elemente der PPR-Modellierung sind in Abb. 6-2 aufgeführt. Sind die Beteiligten des interdisziplinären Teams im Umgang mit einer Systemmodellierung erfahren, kann eine andere Vorgehensweise unter Zuhilfenahme der aufgeführten Benchmarkkriterien getroffen werden.

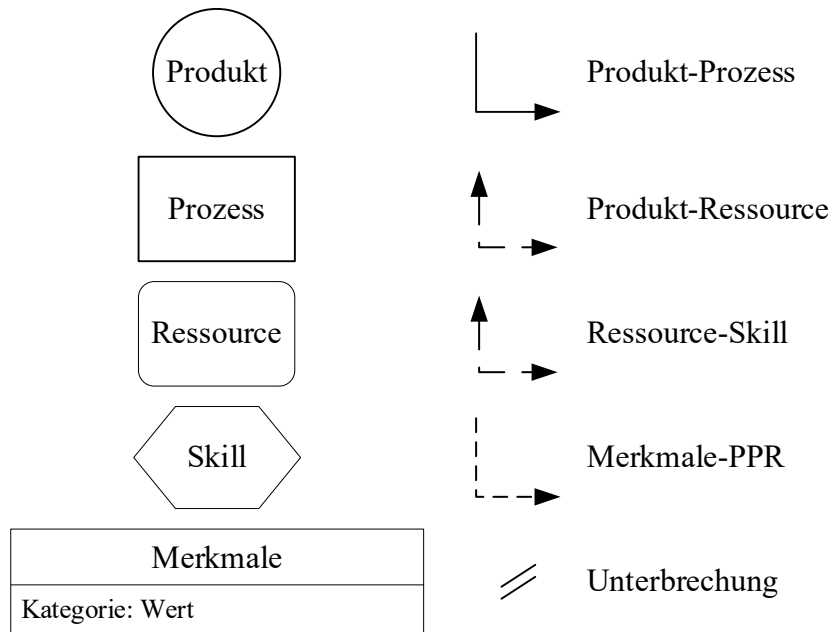


Abb. 6-2: Legende der PPR-Modellierung

Eigene Darstellung auf Basis von (vgl. VDI/VDE 3682 Blatt 1:2015-05)

Die Abb. 6-3 zeigt das PPR-Modell des Produktionsprozesses zur Fertigung des Stators. In diesem spezifisch betrachteten Prozess ist zu erkennen, dass zu jedem Prozessschritt eine Überprüfung der definierten Qualitätsanforderungen durch Prüfsysteme vorgenommen wird. Jedes geprüfte Merkmal wird den jeweils zulässigen Toleranzwerten gegenübergestellt, welche sich für die 20 definierten Hairpintypen unterscheiden. Zu streng gefasste Toleranzen führen zu einem gesteigerten Produktionsausschuss der Einzelhairpins. Die Auswirkung der geometrisch zulässigen Toleranzen der Hairpins werden in den nachfolgenden Prozessschritten „Fügen“ und „Schweißen“ sichtbar. Zu große Toleranzbereiche führen zu einer Überschreitung der zulässigen Fügekräfte, sodass in einer Nachbearbeitung die gesamten 144 Hairpins aus dem Blechpaket entsorgt werden müssen. Eine erste grobe Eingrenzung der zulässigen Toleranzen kann anhand dieses Prozessschrittes vorgenommen werden. Feine Unstimmigkeiten werden in dem Kameraprüfsystem des Schweißprozesses entdeckt. Vor dem Schweißprozess werden die zu schweißenden Hairpinpaare vermessen. Zu große Zwischenräume zwischen zwei Hairpins führen zu einem Prozessabbruch, der in einem manuellen Prüfvorgang durch einen Mitarbeiter, mit anschließendem Entscheid über Nacharbeit oder Ausschuss, untersucht wird. Zu breit gefasste Toleranzen führen demnach zu einem deutlich höheren Ausschuss eines ganzen Stators oder zu der manuellen Nacharbeit.

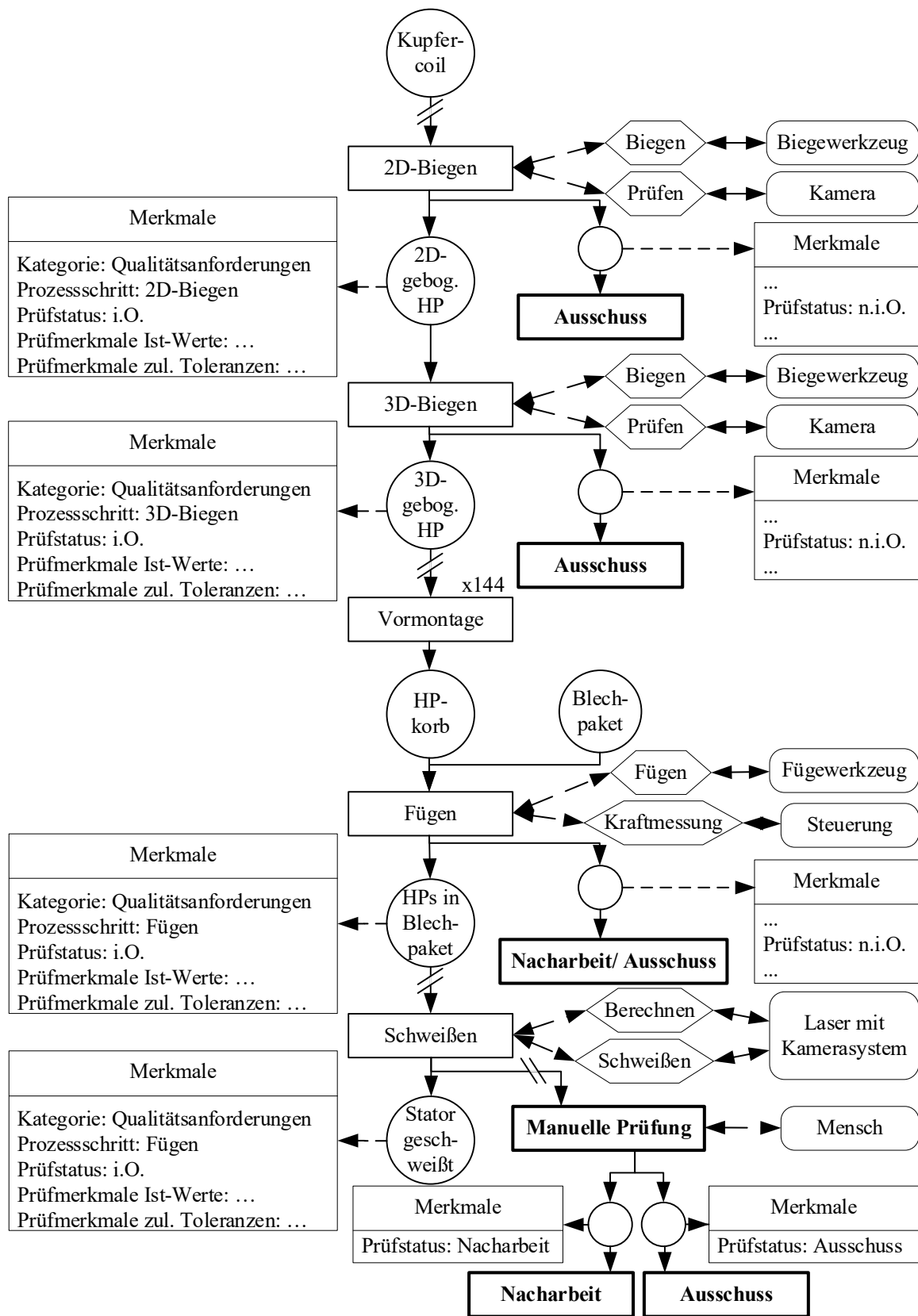


Abb. 6-3: PPR-Modell des Stator-Produktionssystems

Eigene Darstellung auf Basis von (vgl. VDI/VDE 3682 Blatt 1:2015-05)

Der Informationsbedarf der Prozessingenieure ist demnach, welches ein ausgewogener Toleranzbereich für die jeweiligen Hairpintypen ist. Da gleichzeitig auf mehreren Anlagen Hairpins produziert werden, ist eine weitere Fragestellung, inwiefern sich die Toleranzen und Produktionsqualität der baugleichen Anlagen unterscheiden. Einmalig definierte, geometrische Toleranzen können ihre Gültigkeit verlieren, sobald bspw. mechanische Komponenten des Produktionssystems durch z.B. Instandhaltungsmaßnahmen verändert werden. So ist regelmäßig zu überwachen, inwiefern Effekte im Produktionssystem überwacht werden können. Diese lassen sich, wie zuvor beschrieben, anhand der Prozessschritte „Fügen“ und „Schweißen“ ermitteln. Die Modellierung des Informationsbedarfes im PPR-Modell ist in Anhang C gezeigt und folgt der von KARAKI gezeigten Methodik gemäß der Anforderungsaufnahme mittels des QDF (vgl. Karaki, 2023).

Es ist empfehlenswert, in diesem Schritt bereits den Datenanalysten mit einzubeziehen. Dieser setzt die prozessualen Informationsbedarfe erst in Kapitel 6.11, das Projekt kann durch die Datenanalyseexpertise in den Kapiteln 6.1 und 6.3 profitieren. Weiter ist zu sagen, dass dieser Schritt mit einer ausgezeichneten Sorgfalt bearbeitet werden muss. Je unkonkreter die Anforderungen formuliert sind, desto höher ist der spätere Korrekturaufwand der folgenden technischen Leitfadenschritte.

6.2 Stakeholderanalyse

Das Kernteam des hier aufgeführten Projektes wird konkret durch drei Personen gestellt. Eine Person aus der IT-Domäne übernimmt die Rollen des Projektmanagers und des Data Engineers. Die Domäne der Fertigung stellt eine Person für die Vertretung der Interessengruppe der Process Engineers. Eine weitere Person, die über ein spezielles Fachwissen im Bereich der Datenanalyse mit Fertigungsbezug verfügt, übernimmt die Rollen des Data Analysts als auch Requirements Engineers. Diese Rollenpaarung ist gem. Abb. 5-2 aufgrund der Verletzung des vier-Augen-Prinzips als unzulässig gekennzeichnet. Aufgrund der hohen Personenauslastungen wurde diese Rolle nochmals untergliedert, sodass die Validierung der Ergebnisse in das Aufgabenspektrum des Process Engineers verlegt wurde (s. Tab. 6-1).

Der Produktionsprozess selbst verfügt weiterhin über zwei Experten, sowohl für die Hairpinherstellung, als auch für den Schweißprozess, die in einem Ansprechpartner gebündelt werden. Die Rolle des Data Engineers wird unterstützt durch die diversen Experten zu den jeweiligen Prüfsysteme und der Automatisierungstechnik.

Rolle	Kernteam	Weitere Personen
Project Manager		
Data Engineer	IT-Domäne	Einbindung weiterer Experten bzgl. der Prüfsysteme und Automatisierungstechnik
Process Engineer	Fertigungsdomäne	Je ein Experte zur Hairpinherstellung und Schweißen
Requirements Engineer	Person mit speziellen Skills, sowohl in IT als auch Produktion	Übernahme der Validierung durch den Process Engineer
Data Analyst		

Tab. 6-1: Rollenverteilung und -paarung im Anwendungsfall

Eigene Darstellung

6.3 Ermittlung der relevanten Informationsobjekte

In diesem Kapitel werden die identifizierten Informationsbedarfe (in Anhang C in „Requirements“, kurz REQ) in den Informationsclustern (s. Abb. 5-4) zugeordnet, um die benötigten Datenpunkte ermitteln zu können. Hierzu kann, aufgrund ihrer Ähnlichkeit, die Zusammenführung der folgenden Informationsbedarfe vorgenommen werden: REQ-001 & REQ-003, REQ-002 & REQ-004 sowie REQ-005 & REQ-006.

REQ-002 & REQ-004 entsprechen dem „Statistical Process Control (SPC)“. REQ-001 & REQ-003 können, aufgrund des höheren Anspruches an den Informationsbedarfes, dem „Advanced Process Control (APC)“ zugeordnet werden. REQ-005 & REQ-006 entsprechen dem Informationscluster der „Fault Detection (FD)“. Die benötigten Datenpunkte zur Erfüllung des Informationsbedarfes sind in Tab. 6-2 aufgeführt.

ID	Informationsbedarf-Nr.	REQ-00x					
		1	2	3	4	5	6
DP1	Maschinen-ID	x	x	x	x	x	x
DP2	Stator-ID	x		x		x	x
DP3	Hairpin-ID	x	x	x	x		
DP4	Zuordnung der Hairpin-IDs zu einer Stator-ID	x		x			
DP5	Zeitstempel	x	x	x	x	x	x
DP6	Hairpintyp	x	x	x	x		
DP7	Fügekraftüberschreitung	x		x		x	
DP8	Schweiß-Prozessabbruch	x		x			x
DP9	Ist-Werte Prüfmerkmale des 2D-Biegens	x	x				
DP10	Toleranzwerte Prüfmerkmale des 2D-Biegens	x	x				
DP11	Ist-Werte Prüfmerkmale des 3D-Biegens			x	x		
DP12	Toleranzwerte Prüfmerkmale des 3D-Biegens			x	x		
DP13	Ist-Werte Tangentialversatz zweier Hairpins	x		x			
DP14	Ist-Werte Radialversatz zweier Hairpins	x		x			

Tab. 6-2: Identifizierte Datenpunkte zur Erfüllung der Informationsbedarfe

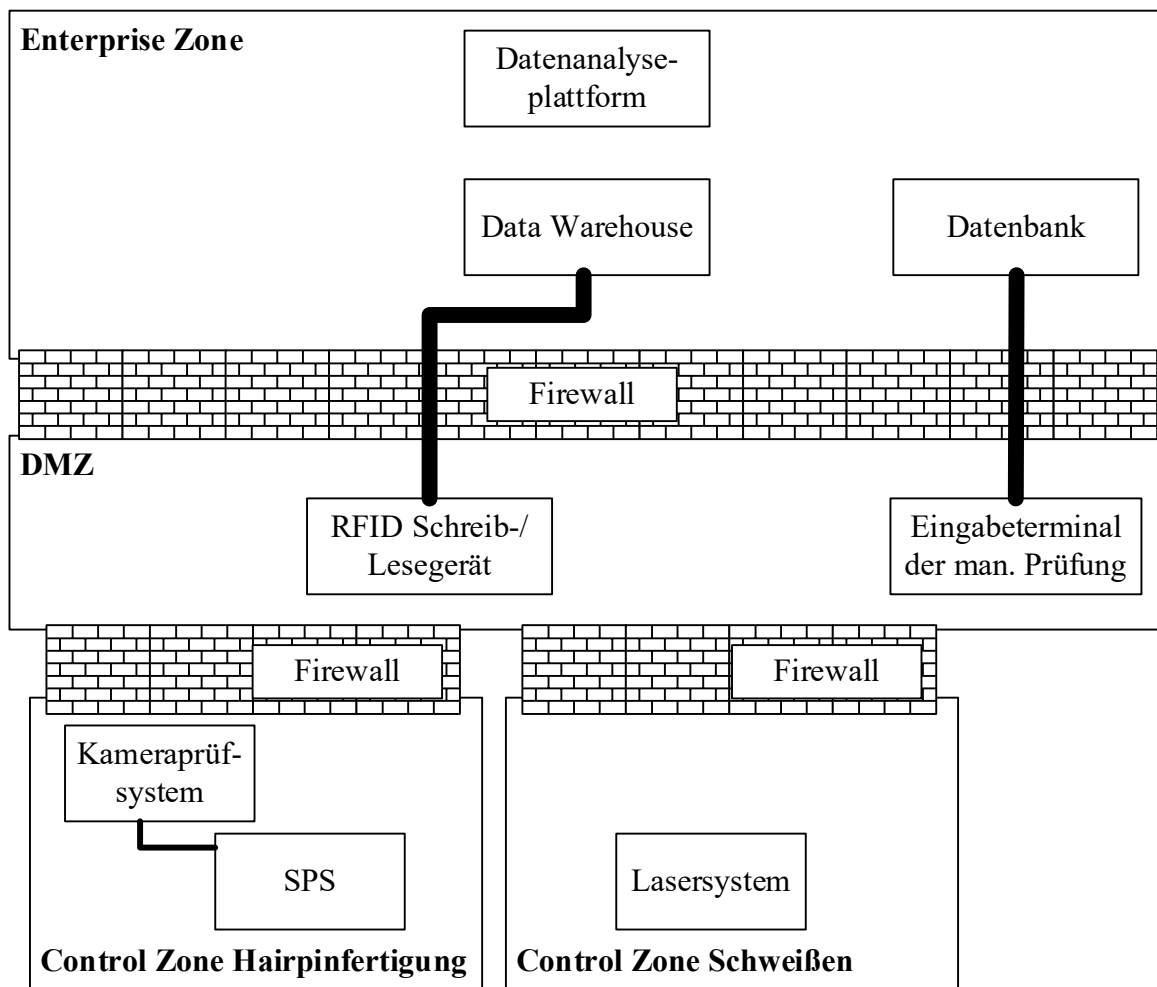
Eigene Darstellung

Mit dieser Aufzählung der benötigten Datenpunkte zur Erfüllung der Informationsbedarfe wird klar, dass diese durchaus mehrfach verwendet werden können. Mithilfe dieser Vorgehensweise wird der zu gewinnende Datensatz auf die notwendige Auswahl reduziert, um die Kosten des Retrofits und der Datenhaltung so gering wie möglich zu halten.

6.4 Aufzeigen der hardwareseitigen Durchgängigkeit

Der Industriebetrieb, in dem der Anwendungsfall betrachtet wird, verfügt bereits über ein bestehendes Netzwerkarchitekturkonzept. Dieses Kapitel zeigt die bestehende Netzwerkarchitektur schematisch auf. Die Darstellung wurde auf die relevanten Designinformationen und die logischen Verbindungen von Komponenten zueinander reduziert. Ergänzende Hinweise sind dem Text zu entnehmen.

Die bestehende Netzwerkarchitektur ist in Abb. 6-4 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Netzwerksegmentierung nicht nur vertikal, sondern durch die Trennung der Control Zones, auch horizontal realisiert ist. Diese Control Zones sind entsprechend der Fertigungsabschnitte der Hairpinfertigung und des Schweißens nach funktionaler Logik getrennt. Elemente der jeweiligen Control Zones sind die automatisierungstechnischen Systemkomponenten (wie bspw. die SPS, das Kameraprüfsystem und das Lasersystem). Weitere Komponenten innerhalb dieser Zonen sind über lokale Switches teilweise miteinander vernetzt. Die Zonenübergänge sind jeweils von Switches und Firewalls gesichert, aufgrund der Übersichtlichkeit sind diese Übergänge in der Abbildung nur rudimentär dargestellt. Die Datenanalyseplattform ist in der Enterprise Zone verortet. Mitarbeiter mit entsprechenden Zugriffen können die aufbereiteten Prozessinformationen aus der Nutzeroberfläche dieser Plattform entnehmen. Ein Übergang zum Internet ist in diesem Anwendungsfall irrelevant, da die Informationsbereitstellung ausschließlich für die Mitarbeitenden vor Ort erfolgt. Ein bestehendes Data Warehouse, welches die Informationen zu Produktinstanzen verwaltet, ist ebenfalls Teil der Enterprise Zone. Hier ist für jeden spezifischen Produkttypen ein erweiterbares Schema definiert. Daten zu den Produktinstanzen werden bspw. mittels mehrerer, an der Fertigungslinie implementierten RFID Schreib-/ Lesegeräten bereitgestellt. Ein weiteres, bestehendes System umfasst mehrere Eingabeterminals entlang der Fertigungslinie, mit deren Hilfe die Fertigungsmitarbeiter ihre manuellen Prüfergebnisse einzelner Produktinstanzen digital erfassen können.



Legende:

— Kommunikationsverbindung innerhalb einer Netzwerkzone

— Kommunikationsverbindung zwischen zwei Netzwerkzonen

Abb. 6-4: Bestehende Netzwerkarchitektur des Anwendungsfalls

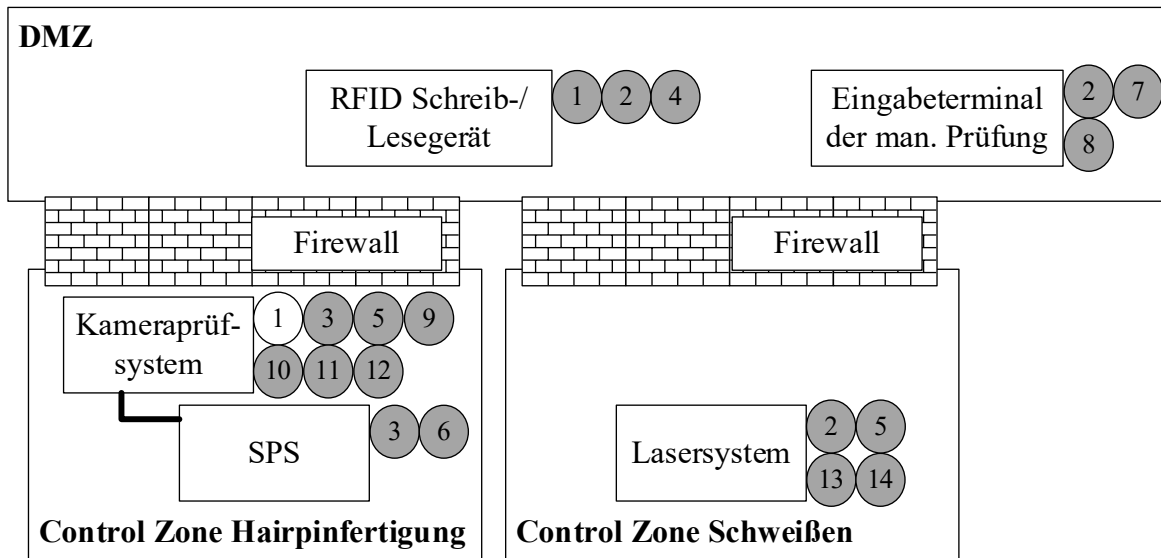
Eigene Darstellung auf Basis von (vgl. IEC 62443-2-1:2010)

Auf Basis dieser Darstellung ist erkenntlich, dass die Kommunikationsverbindungen, ausgehend von den automatisierungstechnischen Komponenten, bis hin zur Datenanalyseplattform aufgebaut werden müssen. Doch die Frage, welche Datenverbindungen genau benötigt werden, kann erst nach der Lokalisierung der exakten Merkmalquellen endgültig beantwortet werden.

6.5 Lokalisierung der Merkmalquelle

In diesem Kapitel werden die Datenquellen identifiziert, die technisch um Kanäle für die Datenbereitstellung erweitert (Retrofit) werden müssen, sodass der Informationsbedarf aus

Kapitel 6.1 erfüllt werden kann. Dazu werden die in Kapitel 6.3 identifizierten, benötigten Datenpunkte den Netzwerkkomponenten aus Kapitel 6.4 zugeordnet. Es resultiert die Lokalisierung der exakten Merkmalquellen.



Legende:

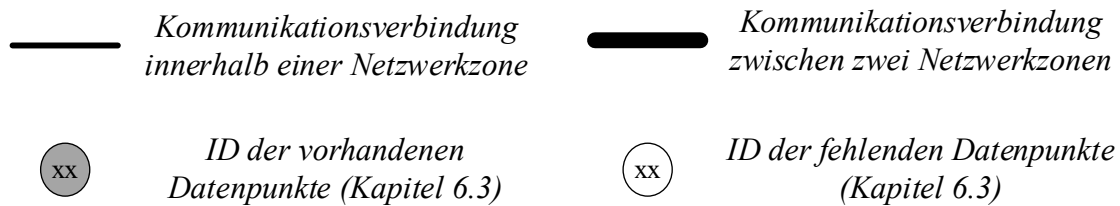


Abb. 6-5: Lokalisierung der exakten Merkmalquellen des Anwendungsbeispiels

Eigene Darstellung auf Basis von (vgl. IEC 62443-2-1:2010)

Die Abb. 6-5 zeigt die Zuordnung der Datenpunkt-IDs (aus Tab. 6-2) in der visualisierten Netzwerkarchitektur. Es muss technisch gewährleistet werden, dass die Datenpunkte des RFID Schreib-/Lesegerätes, dem Eingabeterminal der manuellen Prüfung, dem Lasersystem, des Kameraprüfsystems und der SPS in der Datenanalyseplattform bereitstehen. Die beiden letztgenannten Datenquellen können alleinig auf das Kamerasystem subsummiert werden, da die SPS die Datenpunkte DP3 und DP6 über die bereits bestehende Kommunikationsverbindung übermittelt. Somit wäre das Retrofitting der SPS ein nicht notwendiger Zusatzaufwand. Der Datenpunkt DP1 (Maschinen-ID) ist noch nicht in dem Kamerasystem verfügbar und muss daher softwaretechnisch nachgerüstet werden.

Um das Retrofitting der Datenquellen planen zu können, sind an dieser Stelle die technischen Angaben (genaue Herstellerbezeichnung der verbauten Geräte, Hardware- & Firmwareversionen sowie die IP-Adresse in der Netzwerkarchitektur) aufzuführen. Diese Punkte wurden aufgrund der Anonymisierung des Anwendungsbeispiels in dieser Darstellung nicht

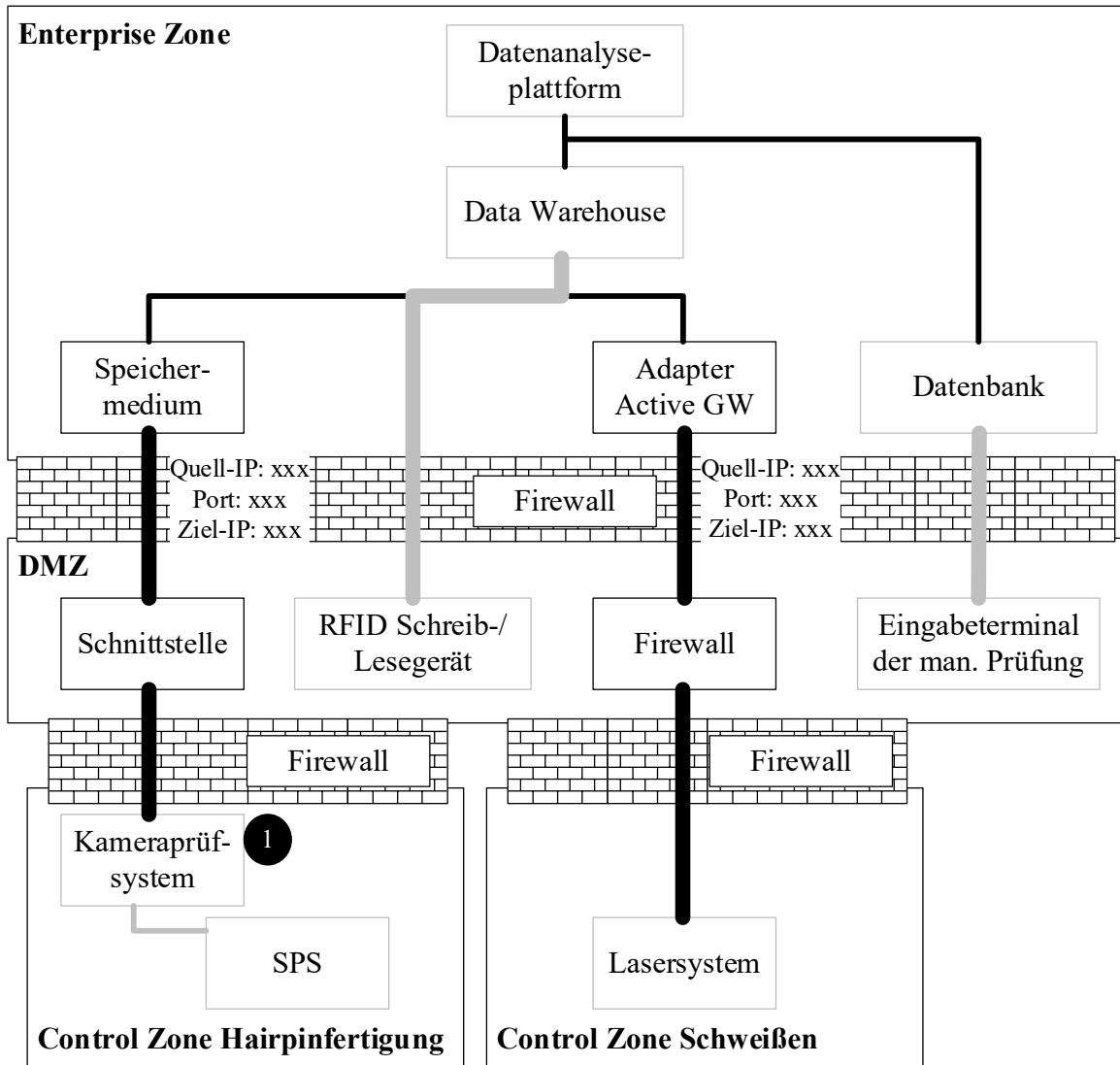
mit aufgeführt. Sollten innerhalb des Betriebes SNMP-Verbindungen zulässig sein, können diese technischen Angaben bspw. mittels herstellerspezifischer Object Identifier (OID) automatisch abgefragt werden⁴². Ist eine Merkmalquelle zu einem Datenpunkt nicht vorhanden, kann die Integration einer externen Sensorik Abhilfe schaffen (vgl. Walenza-Slabe, 2017, S. 7). Einige Sensoren können mit minimalem Aufwand an Maschinen angebracht werden. Es ist dabei auf eine Industrie 4.0-fähige Kommunikation zu achten.

6.6 Ermittlung der Adapterstrategie

Die Ermittlung der relevanten Merkmalquellen in Kapitel 6.5 hat ergeben, dass zonenübergreifende Kommunikationskanäle für das Kameraprüfsystem wie auch für das Lasersystem geschaffen werden müssen. Das RFID-System und das Eingabeterminal verfügen bereits über eine derartige Verbindung, sodass lediglich eine Verbindung zur Datenanalyseplattform geschaffen werden muss. Für die Auswahl eines Adapters, der die funktionalen sowie sicherheitstechnischen Anforderungen erfüllt, sind vorab Benchmarkkriterien mit der Angabe von Mindestanforderungen anzugeben. Dieses wurde in diesem Anwendungsfall durchgeführt, was zu einer entsprechenden Auswahl der Adapterstrategie geführt hat.

Die Basisanforderung für die Adapterauswahl ist die funktionale Kompatibilität mit dem Kameraprüfsystem und dem Lasersystem. Da dies zwei gänzlich unterschiedliche Systeme sind, wird je eine Lösung je System benötigt. Die Lieferanten beider Systeme bieten Lösungen für die Datenbereitstellung. Aus der Nutzersicht werden keine kritischen Anforderungen an die Adapterlösungen gestellt. Grundsätzlich werden die Datenpunkte in beiden Systemen in einer Datenübertragungsrate der Größenordnung von einer Sekunde erwartet. Benötigt wird zudem ein Pufferspeicher, sodass die produktbezogenen Daten nach einer evtl. unterbrochenen Kommunikationsverbindung nicht verloren gehen. Die gesamten IT-Sicherheitsanforderungen können im Rahmen dieser Arbeit nicht gänzlich offengelegt werden. Doch zwei wesentliche IT-Sicherheitsanforderungen für die Herstellung einer Kommunikationsverbindung zwischen der Control Zone und der DMZ in diesem Anwendungsfall sind zum einen eine Mindestanforderung an die Transportverschlüsselung und zum anderen an die Aktualität der Systemkomponenten (wie bspw. das eingesetzte Betriebssystem). Zusätzlich müssen die Automatisierungstechnischen Komponenten ein Whitelisting zulassen.

⁴² Siehe hierzu bspw. eine Beschreibung zur SIMATIC NET der Fa. Siemens (vgl. Siemens AG, 2017).



Legende:

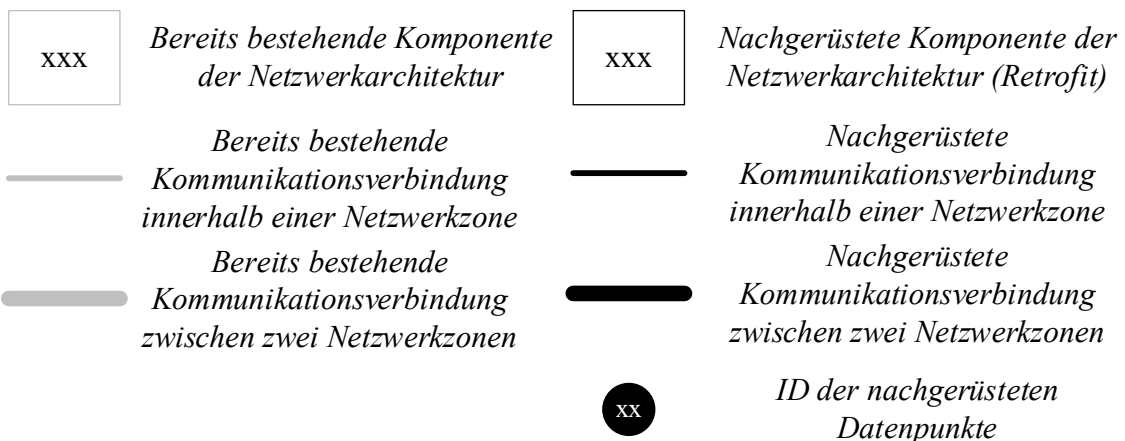


Abb. 6-6: Adapterstrategien des Anwendungsfalls

Eigene Darstellung auf Basis von (vgl. IEC 62443-2-1:2010)

All diese Anforderungen werden von dem Anbieter des Kamerasystems erfüllt, sodass eine Schnittstelle zur direkten Kommunikation (DC) in die DMZ eingerichtet werden kann. Das

Lasersystem kann die Anforderung des Whitelistings nicht erfüllen. Des Weiteren kann die Schnittstelle des Lasersystems nicht auf die Angabe einer Datenziel-IP beschränkt werden. In der interdisziplinären Zusammenarbeit ist eine alternative Lösung zur Kommunikationsherstellung erarbeitet worden. Durch die zusätzliche Kommunikationseinschränkung des Systems in der DMZ werden die Anforderungen erfüllt, sodass der Adapter mit aktivem Gateway des Anbieters implementiert werden darf. Abb. 6-6 zeigt das Konzept der Adapterstrategien.

Bei der Verfügbarkeit und Prüfung mehrerer Adapterstrategien können diese parallel in einer derartigen Darstellung gegenübergestellt werden. Diese Darstellung unterstützt den fachlichen Diskurs innerhalb des interdisziplinären Teams, insbesondere zwischen den Domänen IT und Automatisierungstechnik.

6.7 Durchführung einer Wirtschaftlichkeitsanalyse

Aus der Wirtschaftlichkeitsanalyse geht hervor, ob die zu tätigen personellen und monetären Aufwände für das technische Retrofitting und die Datenanalyse den erwarteten Nutzen erfüllen. An dieser Stelle entscheidet sich die reale Umsetzung der erarbeiteten technischen Lösung oder der Abbruch des Projektes. Das folgende Kapitel umschreibt die im Anwendungsfall formulierte Nutzenerwartung und die ermittelten Kosten.

Die Erwartung an den Nutzen der umzusetzenden Industrie 4.0-Lösung stützt sich überwiegend auf indirekt monetär messbare Nutzenpotentiale. Eine wesentliche Motivation der Durchführung wird sich in der Domäne der Fertigung durch die Reduktion des manuellen Analyseaufwandes erhofft. Bestehende Analysekonzepte stellen die Fertigungsmitarbeiter vor die Herausforderung heterogener Datenquellen. Diese können nur mit hohem manuellem Aufwand zusammengeführt werden, sodass Datenanalysen nur fallspezifisch und zeitlich stark verzögert durchgeführt werden können. Diese aktuelle Vorgehensweise bindet in hohem Maße Mitarbeiterkapazitäten. Laufend mit Daten befüllte Datenanalysen und die Zugänglichkeit dieser Informationen sollen es den Mitarbeitern ermöglichen, ihren Fokus auf die Entwicklung prozessstabilisierender Maßnahmen zu richten. Eine weitere Motivation bildet der Wunsch eines kontinuierlichen Monitorings des Prozesses. Die Erwartung an das Monitoring ist, dass Effekte prozessverändernder Maßnahmen direkt ersichtlich sind und hinsichtlich ihrer Effizienz bewertet werden können. So verringert sich die Reaktionszeit von Korrekturen durch die Fertigungsmitarbeiter auf Maßnahmen mit ggf. negativem Effekt. Erwartet wird eine höhere Produktionseffizienz der Anlagen.

Ein direkt monetär messbarer Nutzen wird durch die Optimierung der Toleranzbereiche zu den Hairpinprüfparametern erwartet. Insgesamt wird eine Reduktion des Produktionsausschusses ganzer Statoren prognostiziert, gleichzeitig sollen nur Hairpins aussortiert werden, wenn diese tatsächlich einen n.i.O.-Stator zur Folge hätten. In der Gesamtbilanz sollte der Ausschuss monetär geringer ausfallen als zuvor. Die wesentlichen monetären Aufwände des Gesamtprojektes umfassen die Ausgaben für die benötigte Hardware und Software sowie die notwendigen Dienstleistungen für die Installation dieser Komponenten, wie auch Modifikation der Software. Der Return on Investment wurde nach wenigen Monaten erreicht.

Neben dem Projektmanagement bildet die Ausarbeitung der Datenanalyse und das Requirements Engineering den höchsten personellen Aufwand. Auf das Kernteam der drei Personen gerechnet, welches alle fünf definierten Rollen abdeckt, lässt sich für das Gesamtprojekt in Summe aller drei involvierten Personen ein durchschnittliches Arbeitspensum von ca. 35 Mitarbeiterstunden/ Woche abschätzen.

6.8 Definition einer Datenstruktur

Die Datenstruktur der produktspezifischen Daten ist bereits durch das bestehende Data Warehouse (s. Abb. 6-4) vorgegeben und ist in diesem Anwendungsfall zu erweitern. Dieses Kapitel beschreibt den Vorgang des Datenmappings in das bestehende Konzept.

Das hier spezifizizierte Data Warehouse folgt einem betriebsinternen Standard und dient der Verwaltung der im Produktionsprozess entstehenden Produktinstanzen. Dies können Teilprodukte, Endprodukte oder Zuliefererteile sein. Die grundlegende Datenstruktur dieser Produktinstanzen teilt sich in einen „Header“ und einen „Body“, entsprechend der, in der DIN SPEC 91345:2016-04 beschriebenen, Logik (vgl. DIN SPEC 91345:2016-04).

Datenquellen, wie bspw. das RFID-Schreib-/Lesesystem, leiten die aufgenommenen, produktbezogenen Daten an das Data Warehouse. Eine neuer Datensatz zu einer Produktinstanz wird auf Basis eines eindeutigen Bezeichners (engl. „Unique Identifier“, kurz UID) angelegt. Diese UID ist bspw. ein definierter DMC. Weitere entstehende Datensätze, wie z.B. Messwerte, ergänzen eine digitale Produktinstanz über diese UID. So ist es unabdingbar, dass neue Datenquellen diese UID ebenfalls übermitteln.

In der Regel bilden jegliche textbasierte Dateiformate in derartigen Umsetzungen keine große Herausforderung. In Hinblick auf Bilddateien ist es empfehlenswert, Bildformate (wie bspw. JPEG) zu wählen, die grundsätzlich für die Speicherung dateiinterner Metadaten geeignet sind (vgl. van Beek, Smith, Ebrahimi, Suzuki, & Askelof, 2003). So kann eine

Zuordnung über den Dateiinhalt und nicht über den Dateinamen erfolgen. Zusätzlich können weitere fachliche Inhalte, wie bspw. Prüfergebnisse, abgespeichert werden. Vor der konkreten Umsetzung der Adapterstrategien sind klare Anforderungen an Dateiformate und -inhalte, insbesondere in Bezug auf die UIDs, zu formulieren.

6.9 Umsetzung der Adapterstrategie

In diesem Kapitel sind alle technischen Designinformationen vorhanden, um die Planung in der Praxis umzusetzen. Im Rahmen des beschriebenen Gesamtprojektes betrug die geplante Umsetzungszeit 16 Wochen. Aufgrund Lieferverzögerungen (Halbleiter) und Iterationen zur Erreichung der notwendigen Datenqualität wurde der geplante Zeitraum um weitere 12 Wochen erweitert. Konkrete Bestandteile der Umsetzungsphase waren der Einkauf der benötigten Hardware, die Beauftragung, Prüfung und Durchführung der Installationen von Hardware und Software sowie die Durchführung von Modifikationen des Kamerasystems zur Bereitstellung des Datenpunktes DP1. Parallel konnte mit der Ausarbeitung der Datenanalysen auf Basis von Testdatensätzen begonnen werden, da die Datenstruktur bekannt war.

Ein Datengewinn sowie -austausch stellt eine zusätzliche Belastung des bestehenden Automatisierungssystems dar. Daher ist es empfehlenswert, nach der Inbetriebnahme des Adapters die Auslastung des Steuerungsprozessors und Netzwerkes zu überwachen.

6.10 Bereitstellung der Informationen für die Applikation

Die Herstellung der Kommunikationsverbindungen zwischen den einzelnen Systemen bis in die Datenanalyseplattform ist in Abb. 6-6 dargestellt. Um neue Datenquellen an das bestehende Data Warehouse anzubinden, werden die entstehenden Daten, Telegramme, o.ä. zunächst durch einen „Filehandling Service“ angenommen. Dieser Mechanismus entnimmt die Metadaten und ordnet sie entsprechend ihrer Zugehörigkeit. Ein nachfolgender „Parsing Service“ führt ein Mapping der Dateninhalte in die Zielstruktur des Data Warehouse aus. Da es sich um ein über Jahre gewachsenes System des betrachteten Betriebes handelt, wäre eine Umstellung auf die OPC UA Informationsmodellierung nur sukzessive möglich. Das vorherrschende Konzept könnte eher als „Schichtenmodell“ angesehen werden.

Weiter werden die produktbezogenen Daten mittels einer REST-Schnittstelle an die Datenanalyseplattform übergeben. Mittels eines Datenbankzugriffes werden zusätzlich die Informationen der manuellen Prüfergebnisse übermittelt. Letztlich stehen alle relevanten Produktdaten im Datenanalysesystem bereit.

6.11 Erstellung einer Applikation

Die kontinuierliche Bereitstellung der Prozessinformationen erfolgt über die Datenanalyseplattform. Mitarbeiter mit entsprechenden Zugriffsberechtigungen können diese Informationen in Form von Dashboards einsehen. Die Auflösung der in Kapitel 6.1 formulierten Informationsbedarfe wird in diesem Kapitel vorgestellt.

Die entwickelten statistischen Datenanalysen basieren auf der methodischen Vorgehensweise des Testens aufgestellter Hypothesen durch die Domänenexperten der Fertigung. Eine Fragestellung richtete sich auf den Vergleich eingestellter Prüf-Toleranzwerte der verschiedenen, baugleichen Hairpinanlagen und die Häufigkeitsverteilung der Ist-Werte dieser Prüfmerkmale (REQ-002 & REQ-004). Die Abb. 6-7 zeigt wie die Informationsbereitstellung zur Erfüllung der Bedarfe erfolgt. Mittels mehrerer Dropdown-Menüs können der gewünschte Zeitbereich, der zu betrachtende Hairpintyp und das Prüfmerkmal ausgewählt werden. Mithilfe dieser Dashboards können die eingestellten Prüftoleranzen, wie auch die geprüften Ist-Werte, zwischen den baugleichen Hairpinanlagen miteinander verglichen werden.

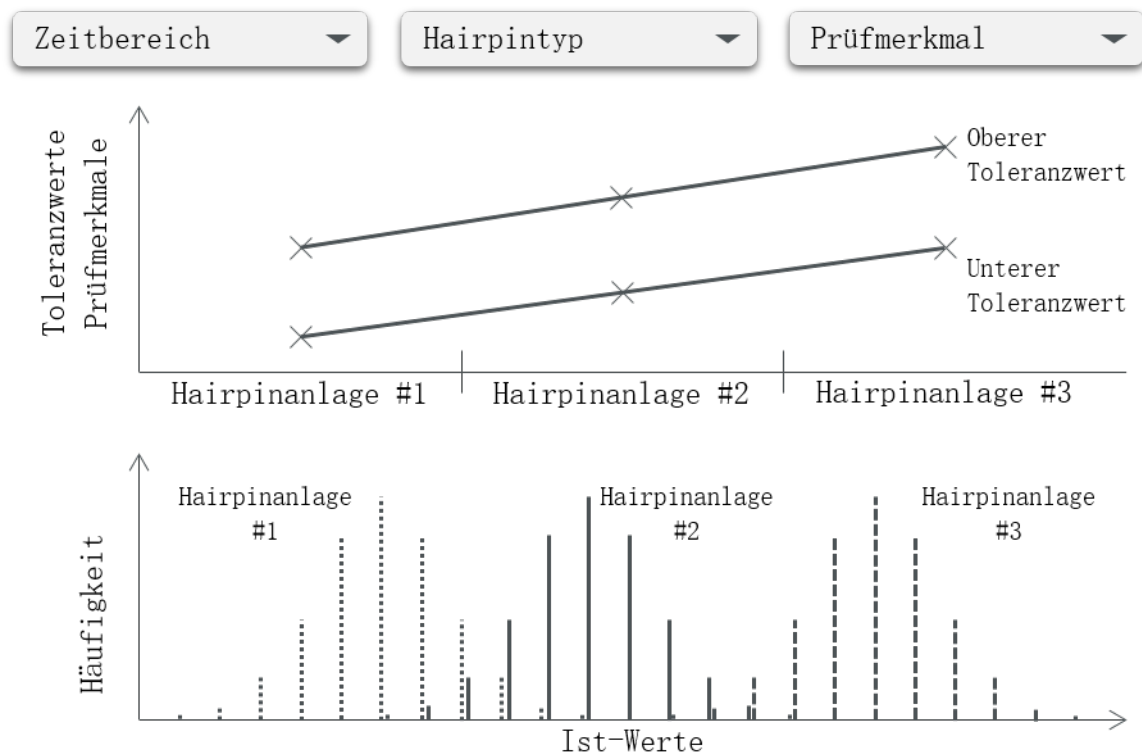


Abb. 6-7: Eingestellte Prüf-Toleranzwerte und Ist-Werte der Prüfmerkmale je Hairpinanlage

Eigene Darstellung

Ein weiterer Informationsbedarf bestand darin, die Ermittlung ausgewogener Toleranzbereiche datenbasiert zu erproben. Formuliert wurden hierfür REQ-001 und

REQ-003. Die obere Darstellung in Abb. 6-8 zeigt, dass unter der Auswahl der Hairpinanlage und des Prüfmerkmals die Häufigkeiten der Über- bzw. Unterschreitung der eingestellten Prüf-Toleranzen über einen ausgewählten Zeitbereich aufgezeigt werden. Eine zusätzlich implementierte Funktionalität ist die Information über eine vorgenommenen Toleranzwertänderung. Die untere Darstellung zeigt die aufgetretenen Fehler im späteren Fertigungslinienvorlauf. Mithilfe dieser Dashboards können ausgewogene Toleranzbereiche an den Hairpinanlagen sukzessive, iterativ erprobt werden, während parallel die fortfolgenden Auswirkungen auf die Produktionsqualität überwacht wird.

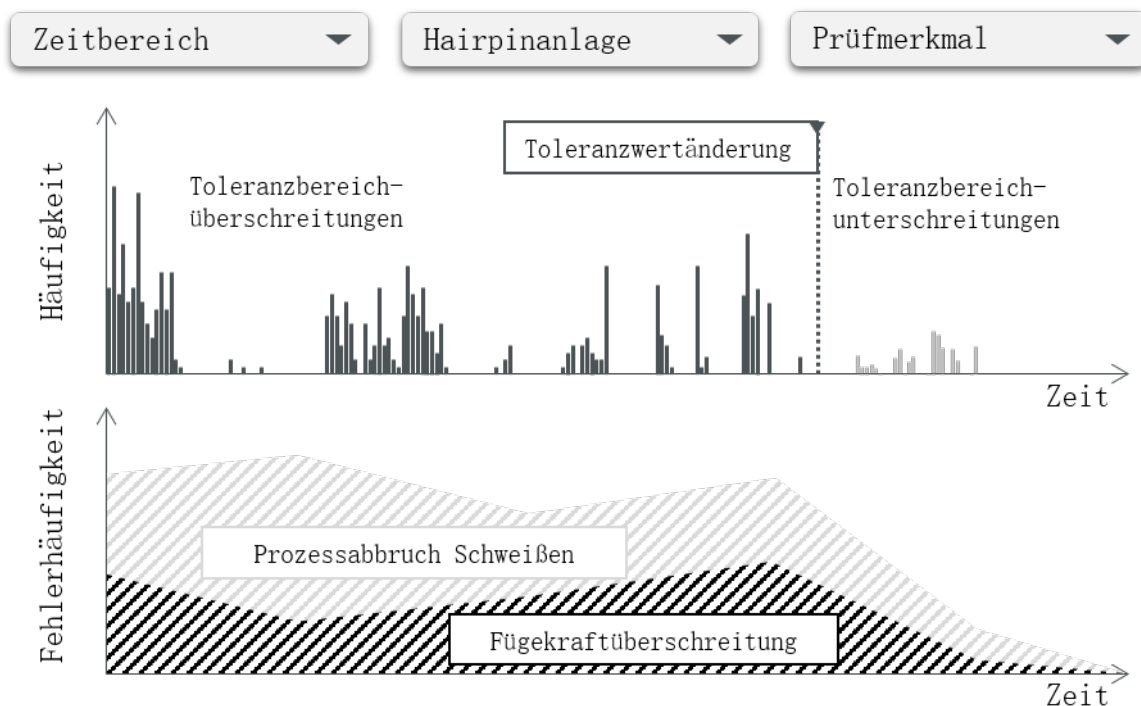


Abb. 6-8: Gegenüberstellung der Toleranzwerteinstellungen und Fehlerhäufigkeiten

Eigene Darstellung

Zur Erfüllung der Informationsbedarfe REQ-005 & REQ-006, also der Rückführung der aufgetretenen Fehlermerkmale „Fügekraftüberschreitung“ und „Prozessabbruch Schweißen“ auf die Hairpinanlagen, ist die, in Abb. 6-9 beispielhaft gezeigte, Heatmap entstanden. Aufgetretene Fehlermerkmale an den Anlagen für die Prozessschritte „Fügen“ und „Schweißen“ mit einer Auftretshäufigkeit zu je 10 können ihrem Ursprung zugeordnet werden. Mithilfe dieser Darstellung werden den Fertigungsmitarbeitern die exakten Hairpinanlagen mit Optimierungspotential aufgezeigt.

Zeitbereich ▼

Fehlermerkmal	Hairpin-anlage #1	Hairpin-anlage #2	Hairpin-anlage #3	Füge-anlage	Schweiß-anlage
Fügekraft-überschreitung	0	5	5	10	0
Prozessabbruch Schweißen	1	3	6	0	10

Abb. 6-9: Heatmap zur Eingrenzung der fehlerverursachenden Hairpinanlage

Eigene Darstellung

Im Rahmen des benannten Projektes ist eine Vielzahl solcher Dashboards basierend auf den insgesamt aufgenommenen Informationsbedarfe entstanden. Diese gezeigten Inhalte stellen lediglich einen Ausschnitt des Gesamtprojektes dar, um die Vorgehensmethodik zu erläutern.

Sind die Informationsbedarfe eines Datenbestandes vermeintlich ausgeschöpft, ist in Betrieben die Veranstaltung sogenannter „Hackathons“ zu beobachten. Bei solchen Veranstaltungen wird (betriebsinternen) Wettkampfsteilnehmern mit Datenanalyseerfahrung ein ausgewählter Teil der realen Daten bereitgestellt. Das Ziel eines derartigen Wettkampfes ist es neue Ideen, Potentiale und Geschäftsmodelle zur Ausschöpfung der im Datenbestand enthaltenen Informationen zu entwickeln (vgl. Bosch.IO GmbH, kein Datum) (vgl. Bluma, Kaupaitè, & Arndt, 2021) (vgl. Albers, et al., 2022).

6.12 Validierung des Gesamtprojektziels durch die anfordernde Domäne

Wie eingangs bereits erwähnt, bildet der im Rahmen dieser Arbeit dargestellte Anwendungsfall einen ausgewählten Teil eines Gesamtprojektes in der gesamten Fertigungslinie der Statorproduktion. Insgesamt wurden 57 Informationsbedarfe entsprechend der dargestellten Methodik ermittelt und äquivalente Lösungen erarbeitet. Parallel wurde eine weitere Digitalisierungsmaßnahme wie auch mechanische Optimierungen eingeleitet. Die Auswirkungen aller getroffenen Maßnahmen werden innerhalb dieses Kapitels in Summe vorgestellt.

Die tangiblen Nutzenpotentiale lassen sich anhand zweier Kriterien in der Fertigungslinie ableiten. Nach KLETTI ET AL. bildet ein Kriterium die Gesamtanlageneffektivität (engl. „Overall Equipment Effectiveness“, kurz OEE). Der OEE bildet über die Berechnung der Faktoren Verfügbarkeit, Leistung und Qualität von Maschinen einen wichtigen Leistungsindikator eines Fertigungsprozesses (vgl. Kletti & Rieger, 2022).

Es ist zu berücksichtigen, dass nicht die Digitalisierungsmaßnahmen per se zu positiven Entwicklungen des Produktionsprozesses führen. Die Mitarbeiter des Produktionsprozesses sind nun in der Lage, gezielte fertigungstechnische Maßnahmen auf Basis der umfangreicheren, bereitstehenden Prozessinformationen abzuleiten und die entstehenden Auswirkungen ihrer eingeleiteten Maßnahmen zu beobachten. Die Mitarbeiter haben durch die Unterstützung dieser Industrie 4.0-Umsetzung eine fundierte Entscheidungsbasis, welche vorher nur eingeschränkt gegeben war. Ein wesentlicher Bestandteil des Projektes war eine breite Akzeptanz bzgl. der geschaffenen Lösungen zu schaffen und den Umgang mit dieser neuen Informationsquelle zu schulen. Der Produktionsausschuss konnte mithilfe der, durch die Prozessingenieure abgeleiteten Maßnahmen nachweislich gesenkt und der OEE gesteigert werden.

7 Zusammenfassung und kritische Betrachtung

Dieses Kapitel fasst die gesammelten Erkenntnisse der Arbeit zusammen und stellt einen Bezug zu den aktuellen Herausforderungen der Industrie 4.0 Umsetzung in der industriellen Praxis her.

7.1 Aktuelle Herausforderungen bei der Umsetzung von Industrie 4.0

Die aktuellen Herausforderungen bei der Umsetzung von Industrie 4.0-Projekten im industriellen Umfeld wurden in der Literatur mehrfach thematisiert. Im Rahmen dieser Zusammenfassung werden fünf Kernherausforderungen diskutiert, zu denen diese Arbeit beiträgt.

Eine Herausforderung, die allgemein für mechatronische Systeme gilt, ist die *Interdisziplinarität* (Herausforderung 1). Die Evolution mechatronischer Systeme hin zu cyber-physischen Systemen bedarf der Anbindung der heterogenen Automatisierungstechnik an bestehende IT-Infrastrukturen. Zur Erreichung dieser Evolutionsstufe müssen demzufolge neue Akteure aus den Domänen der IT- und Datenanalyse in die bestehenden Systeme erfolgreich einbezogen werden. Die Segmentation des Gesamtvorhabens in 11 Teilaufgaben in Kapitel 5 hat gezeigt, wie eine Kapselung der Hauptaufgaben in ihren Expertendomänen erfolgen kann und Designinformationen mittels einer Kopplung übergeben werden.

Eine weitere Herausforderung in der Umsetzung von Industrie 4.0 bildet die wiederholend formulierte, fehlende *Standardisierung* (Herausforderung 2). In der prototypischen Anwendung (Kapitel 6) hat sich herausgestellt, dass nicht eine fehlende Standardisierung das zentrale Problem darstellt. Denn gewisse Ansätze wie bspw. die OPC UA Informationsmodellierung sind bereits vorhanden. Doch die Adaptierung dieser Standards in bestehenden Industriebetrieben kann nur sukzessive erfolgen, da bereits funktionierende Strukturen geschaffen sind und der, durch die ACATECH propagierte Leidensdruck, wie in der Quelle beschrieben, nicht stark genug ist (vgl. Hirsch-Kreinsen, et al., 2022).

Eine weitere Herausforderung bildet die *Akzeptanz* gegenüber der neuartigen Form der datenbasierten Informationsbereitstellung (Herausforderung 3). Die Durchführung des angeführten Beispiels hat von der hohen Akzeptanz aus der Domäne der Produktion profitiert. Doch es hat sich in der Erarbeitung ebenfalls gezeigt, dass anfänglich gewisse negative Motivationen präsent waren. Dieses Hemmnis ist nicht zu vernachlässigen, denn eine immer wiederkehrende Erfolgsprämisse ist das Teilen der vorhandenen Prozessinformationen und der bestehenden Informationsbedarfe, wie auch die Erarbeitung

von Designinformationen innerhalb des interdisziplinären Teams. Die erfolgreiche Umsetzung eines solchen Projektes ist maßgeblich von der Akzeptanz aller involvierten Domänen abhängig. Dies konnte im Speziellen dadurch erreicht werden, dass in einer frühen Phase bereits erste prototypische Teilerfolge in Datenanalysen an die anfordernde Domäne zurückgespiegelt werden konnten.

Die fehlende Möglichkeit geeignete *Geschäftsmodelle* (Herausforderung 4) zu erkennen und zu erarbeiten ist ein mehrstufiger Prozess entlang der präsentierten Vorgehensmethodik. Die Zuhilfenahme des MBSE vereinfacht diesen Erhebungsprozess, erfordert gleichzeitig jedoch in der Praxis eine rare Expertise und eine nicht unerhebliche zu erbringende Vorleistung. Während etablierte Lösungen wie bspw. SysML ein großes Möglichkeitsspektrum hinsichtlich der Funktionalitäten wie auch verfügbarer Instrumente bietet, stellt dieses gleichzeitig ebenfalls eine hohe Einstiegshürde für Neueinsteiger dar. Es hat sich gezeigt, dass PPR eine vergleichsweise niedrige Einstiegshürde bildet und eine hinreichende Modellierung der relevanten Aspekte liefert. Aktuell existieren allerdings noch keine praktikablen Instrumente für die Umsetzung von PPR in der industriellen Praxis.

Die letzte hier zu erwähnende Herausforderung ist die *Strategiefähigkeit* (Herausforderung 5). In Hinblick auf die durchgeführten Retrofittings sind in der Literatur einige erfolgreiche Durchführungen zu erkennen. Bislang sind die Lösungen hin zu einer Konnektivität überwiegend unter idealen Laborbedingungen durchgeführt worden, ohne auf eine übergreifende Vorgehensmethodik zu referenzieren. Solch eine Herangehensweise bindet in der industriellen Praxis zu hohe personelle, wie auch monetäre Aufwände. Die Vorgehensweise wurde anhand des in Kapitel 5 dargestellten Leitfadens generisch aufgearbeitet. Die einzelnen Schritte ermöglichen es nun weiteren Anwendern, diese Methodik auf ihren spezifischen Betrachtungsfall anzuwenden und sich an der beigefügten Best-Practice zu orientieren.

7.2 Methodenkritik und Lessons Learned aus der prototypischen Anwendung

Die Methodenkritik bezieht sich auf die in den Kapiteln 4 und 5 präsentierten Inhalte. Parallel fließen die gewonnenen Erkenntnisse aus Kapitel 6 in die Kritik ein.

Das RAMI 4.0 suggeriert, es könne mit der Herstellung der Kommunikationsfähigkeit eines Assets „Produkt“ die Informationsschicht erreicht werden. Tatsächlich kann die Kommunikationsfähigkeit von Produkten im Sinne eines Produktionssystems jedoch nicht in allen Fällen hergestellt werden. Trotz alledem kann es von wirtschaftlicher Relevanz sein, einen Zugang zu den Informationen eines Produkts zu erhalten.

Die in Kapitel 4 eingeführte Erweiterung der Referenzarchitektur zur Industrie 4.0-Komponente zeigt auf, wie die Verwaltungsschale zu einem physischen Objekt ohne Kommunikationsfähigkeit entstehen kann. Ein hoher Automatisierungsgrad von Produktionssystemen bietet das Potential, die notwendigen Informationen zu einem Produkt zu kommunizieren. Im Idealfall sind Industrie 4.0-fähige Assets „Field Device“ und „Control Device“ im Produktionssystem implementiert. Doch die Langlebigkeit der Automatisierungstechnik und ein hoher Automatisierungsgrad (wie in Deutschland) führen dazu, dass die Realität der Industriebetriebe sich durch eine heterogene OT auszeichnet. Über Jahre bestehende Technik (Brownfield) ist demnach nicht in jedem Fall kommunikationsfähig. Die erweiterte Referenzarchitektur zeigt, dass diese Kommunikationsfähigkeit von Merkmalquellen unter Zuhilfenahme verschiedener Adaptervarianten trotz alledem hergestellt werden kann, um letztendlich die Potentiale der Industrie 4.0 ausschöpfen zu können.

Die schrittweise Umsetzung der erweiterten Referenzarchitektur ist in dem Leitfaden in Kapitel 5 beschrieben. Den initialen Startpunkt bildet dabei die Identifikation des Geschäftsmodells, welches über die ersten drei Schritte etappenweise erarbeitet wird. Empfohlen wird dazu die Verwendung des MBSE statt einer dokumentenbasierten Vorgehensweise. Dies bietet den Vorteil, dass Prozessinformationen im interdisziplinären Team ausgetauscht werden können. Es entsteht eine graphische Darstellung der kollektiv bereitstehenden Prozessinformationen, wie auch der Informationsbedarfe. Gleichzeitig erfordert das MBSE in der Praxis eine rare Expertise, die wiederum eine Einstiegshürde darstellt. Diese Kompetenz muss zwingend gestärkt werden, um auf diesem Weg geeignete Geschäftsmodelle identifizieren zu können. Ein weiterer Vorteil bei der Wahl des MBSE besteht darin, dass ein Produktionssystem als sozio-technisches System modelliert werden kann. In Anbetracht der Auswahl einer geeigneten Datenanalysemethode ist es notwendig, die Stellen des stochastischen, menschlichen Einflusses im Produktionssystem deutlich aufzuzeigen.

Die Abstraktion der natürlichsprachlichen, prozessualen Informationsbedarfe in Informationscluster bietet die Möglichkeit, die spezifischen Projektziele zu klassifizieren, auf Basis derer die Auswahl der geeigneten Datenanalysemethoden stärker eingegrenzt wird. Zusätzlich können die zu gewinnenden Datenpunkte abgeleitet werden. In der Praxis ist zu beobachten, dass ausschließlich nach den notwendigen Datenpunkte gefragt wird. In erster Linie ist das kein verwerflicher Ansatz. Aufgrund der bislang fehlenden strukturierten Vorgehensweise können diese allerdings nur mühsam identifiziert werden. Im ungünstigsten Fall werden keine konkreten Datenpunkte genannt, mit dem Verweis darauf, dass alle möglichen Datenpunkte zu gewinnen sind. Solch eine Vorgehensweise führt zu

unrealistischen Projektzielen, einer unnötigen Belastung der OT wie auch IT und letztendlich Unzufriedenheit im interdisziplinären Team. Daher ist es dringend empfehlenswert, diese notwendige Vorarbeit gewissenhaft zu leisten.

Die weiteren technischen Designinformationen werden aus den bereitgestellten Prozessinformationen abgeleitet. Dieses wiederum entspricht den gängigen Methoden der Automatisierungstechnik und Informatik. Die Analyse der prozessualen sowie OT- und IT-Bedingungen liefert die Benchmarkkriterien der auszuwählenden Adapter zur Herstellung der Konnektivität.

Auf Basis aller gesammelten Informationen bzgl. des Prozesses und der technischen Komponenten wird eine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt. Diese stellt sowohl Nutzen, wie auch zu erbringende Aufwände des gesamten Industrie 4.0-Projektes gegenüber. Bis zur Erreichung dieses Leitfadenschrittes wurden bereits personelle Aufwände zur Sammlung aller Informationen getätigt. Daher wird dazu tendiert, an dieser Stelle keine objektive Entscheidung über die Weiterführung oder einen möglichen Abbruch des Vorhabens zu treffen. Ein Abbruch sollte und muss an dieser Stelle eine reale Option darstellen. Die anschließende Umsetzung der ausgewählten Adapterstrategie folgt der erarbeiteten OT- und IT-technischen Planung. Die Zusammenführung aller produktspezifischen Daten in einer Datensinke, wie auch die Bereitstellung der Informationen an eine Datenanalyseplattform stellen in der Praxis ein ebenso heterogenes Bild dar, wie die OT selbst. In der industriellen Praxis hat sich gezeigt, dass es noch deutliche Arbeitspunkte hinsichtlich der Industrie 4.0 gibt, wie bspw. die stärkere Nutzung der Standards der OPC Foundation. Der Leitfaden ist daher an gewissen Stellen flexibel gestaltet, sodass auch Technologien aus dem vorangegangenen Industrie 4.0-Zeitalter verwendet werden können

Die Erstellung der konkreten Datenanalysen bildet den letzten Schritt des Leitfadens. Zur Aufrechterhaltung der positiven Motivation, insbesondere der Domäne der Produktion, ist es empfehlenswert, frühestmöglich erste ausgewählte Informationsbedarfe auf Basis von Testdatensätzen zu lösen. Das schärft nicht nur das Zielbild des Projektes, sondern zeigt auch Schwächen der Anforderungsanalyse auf. Die Schritte des Leitfadens bauen zwar aufeinander auf, können aber sowohl iterativ zu jedem Zeitpunkt der Durchführung ergänzt werden oder Aktivitäten wie bspw. die Datenanalyse können parallel gestartet werden. Dies liegt im Ermessen des Kernteams.

7.3 Wissenschaftlicher Beitrag

Dieses Kapitel greift die zu Beginn formulierten Forschungsfragen und -ziele auf und stellt dar, in welcher Form diese im Rahmen der präsentierten Arbeit erfüllt wurden. Die in Kapitel 3 hergeleitete Forschungsfrage war:

Können die bisherigen wissenschaftlichen Erkenntnisse in der Digitalisierung und Industrie 4.0 zu einem praktischen, sozio-technischen Gesamtkonzept in zielgruppenorientierter Sprache vereinigt werden, um die Reifegradstufe der Transparenz eines Produktionsprozesses zu erreichen?

Das erste Forschungsziel war daher die Entwicklung einer generischen Referenzarchitektur vor dem Hintergrund des sozio-technischen Gestaltungsansatzes.

Die in Kapitel 4.2 gezeigte Referenzarchitektur setzt auf dem bekannten Modell zu der Industrie 4.0-Komponente auf und erweitert diese um die Verbindung von Asset und Verwaltungsschale über sogenannte Adapter sowie des Menschen als bedeutenden Einflussfaktor in der physischen Welt. Der Mensch analysiert die Merkmale der Assets und greift im Falle der Notwendigkeit regulierend in den Produktionsprozess ein. Vor der Umsetzung der Industrie 4.0 erfolgt dies auf Basis konventionell gesammelter Informationen. Mit der Industrie 4.0 können Informationen, auf Basis von in einen prozessualen Kontext gebrachten Daten, bereitgestellt werden. Die datenbasierte Informationsbereitstellung hat das Potential, die stochastische Einflussnahme der verschiedenen, im Prozess agierenden Menschen, stärker zu determinieren. Allen Akteuren liegen die gleichen, aufbereiteten Prozessinformationen zugrunde, sodass auch die Entscheidung über prozessbeeinflussende Maßnahmen ähnlicher werden.

Das zweite Forschungsziel war die Entwicklung einer konkreten, modularen und zweckorientierten Vorgehensmethodik basierend auf der entwickelten Referenzarchitektur unter Berücksichtigung der bereits vorhandenen Industrie 4.0-Standards sowie der Interdisziplinarität.

Dieses Forschungsziel wurde mit dem, in Kapitel 5, dargestellten Leitfaden erreicht. Eine wesentliche Kernherausforderung ist dabei die sukzessive Identifikation relevanter Informationsbedarfe und damit Geschäftsmodelle sowie Datenpunkte für die Zieldefinition. Eine weitere Kernherausforderung ist die technische Herstellung der Konnektivität selbst. Aufgrund der Segmentierung des gesamten Leitfadens in 11 Schritte konnte die Zielgruppenorientierung in dem interdisziplinären Vorhaben erreicht werden. Die einzelnen Schritte sind entsprechend der vorhandenen Domänenkompetenzen aufgeteilt. Die jeweils

zu den Schritten vorhandenen Erkenntnisse bzgl. der Industrie 4.0 wurden aufgezeigt und referenziert. In Kapitel 6 wurde die Methode validiert und verfeinert.

Der konkrete wissenschaftliche Beitrag dieser Arbeit zielt insgesamt konkret auf die operative Umsetzung der Industrie 4.0, unter Berücksichtigung der technischen sowie sozialen Einflussfaktoren gleichermaßen, in der industriellen Praxis ab. Die Evaluation ist entsprechend der gewählten wissenschaftlichen Methodik, der Design Science, anhand einer prototypischen Anwendung der entwickelten Methodik erfolgt. Damit zählt diese Arbeit in die, durch den ARBEITSKREIS INDUSTRIE 4.0 formulierten Handlungsbedarfe der Standardisierung und Referenzarchitektur, Beherrschung komplexer Systeme sowie Arbeitsorganisation und -gestaltung ein (vgl. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V., 2013).

8 Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit sind weitere Ideen auf Basis der gezeigten Methodik entstanden, die Weiterführungspotentiale aufweisen. Diese Potentiale werden in diesem abschließenden Kapitel aufgezeigt.

Die Methodik zur Umsetzung von Industrie 4.0-Projekten zeigt aktuell 11 wesentliche Schritte und wurde durch die prototypische Anwendung untermauert. Der präsentierte Leitfaden bildet eine Handlungsempfehlung auf Basis der Beobachtung wissenschaftlicher und praxisbezogener Vorgehensweisen. Die Wertigkeit und Stichhaltigkeit der gezeigten Methodik ist durch die wiederholte Anwendung in verschiedenen Beispielen weiter zu steigern. Es besteht das Potential, die grundlegenden Schritte fundiert zu erweitern oder diese im Detail um praktikable Werkzeuge zu ergänzen. Da die Forschung im Rahmen der Industrie 4.0 noch immer ein sehr aktives Feld ist, werden in der Zukunft sicher neue, ergänzende Erkenntnisse resultieren.

Die aktuelle Methodik zielt in ihrer aktuellen Ausführung auf Brownfield-Anwendungsfälle ab. Eine Frage, die sich im Rahmen dieser Arbeit ergeben hat, ist: Inwiefern lassen sich die gewonnen Erkenntnisse und die entwickelte Methodik auf Planungsszenarien des Greenfields anwenden? Eine Vermutung diesbezüglich ist, dass die Vorgehensweise in den Kernbestandteilen nicht abweichen wird. Wie auch im Greenfield ist bezüglich der Datenbasis vorab ein Geschäftsmodell zu identifizieren und es sind entsprechende technische Voraussetzungen zu schaffen. Die Rolle des Prozessingenieurs wird in diesem Szenario wahrscheinlich durch einen Entwicklungsingenieur ersetzt werden müssen, welcher das Wissen über den geplanten Prozess bereitstellt. Dieses Prozesswissen wird ohnehin für verpflichtende Meilensteine der Planung benötigt, wie bspw. in der engl. „Failure Mode and Effects Analysis“ (FMEA).

In der industriellen Praxis können zwei Potentiale identifiziert werden. Erstens werden durch die mehrfache Durchführung der Methodik innerhalb einer Fabrik zunehmend Designinformationen über die vorherrschenden, technischen Gegebenheiten gesammelt. Die zugrundeliegende Idee besteht darin eine „Connectivity-Landkarte“ der Fabrik auf Basis der herausgearbeiteten Informationen aufzubauen. So entsteht sukzessive ein gesamtheitliches Bild des Industrie 4.0-Reifegrads des Bereiches der Produktion innerhalb einer Fabrik. Die zentrale Sammlung dieser Designinformationen bspw. in einem System für das Assetmanagement (von Produktionssystemen) ermöglicht die Synergiebildung einmalig ermittelter Konnektivitätsstrategien.

Die Anwendung der Methodik und der Versuch, den Handlungsempfehlungen der im Rahmen der Industrie 4.0-definierten Standards in der Praxis zu folgen, zeigt die konkreten Handlungsbedarfe eines Betriebes auf. Dies ist das zweite Potential in der industriellen Praxis. Einige Punkte der prototypischen Anwendung haben aufgezeigt, dass die Standards des Industrie 4.0-Gedankens noch nicht vollumfänglich im Betrieb umgesetzt sind. Die Identifikation dieser Punkte und das Schaffen alternativer Lösungsoptionen haben konkrete Diskussionen der strategischen Handlungsbedarfe aufgeworfen. In diesem konkreten Anwendungsfall wird weiterführend untersucht, wie der Industrie 4.0-Gedanke weiter im Betrieb gestärkt werden kann.

Literaturverzeichnis

- Abel, J., Hirsch-Kreinsen, H., & Wienzek, T. (2019). *Akzeptanz von Industrie 4.0. Abschlussbericht zu einer explorativen empirischen Studie über die deutsche Industrie.* (Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0, Hrsg.) Abgerufen am 23. Februar 2023 von <https://www.acatech.de/publikation/abschlussbericht-akzeptanz-in-der-industrie-4-0/>
- acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V. (2013). *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0.* (P. K. Wissenschaft, Hrsg.) Frankfurt/Main. Abgerufen am 02. August 2022 von <https://www.acatech.de/publikation/umsetzungsempfehlungen-fuer-das-zukunftsprojekt-industrie-4-0-abschlussbericht-des-arbeitskreises-industrie-4-0/>
- Al-Badri, J., Al-Scheikly, B., & Binder, K. (Hrsg.). (Juli 2022). Feldbusprodukte. *Zeitschrift für Automatisierungstechnik*(7). Abgerufen am 23. März 2023 von [https://cdn.tedo.be/tedo-docs/4/SPS-MAGAZIN_7_\(Juli\)_2022.pdf](https://cdn.tedo.be/tedo-docs/4/SPS-MAGAZIN_7_(Juli)_2022.pdf)
- Albers, A., Dumitrescu, R., Gausemeier, J., Lindow, K., Riedel, O., & Stark, R. (2022). *Strategie Advanced Systems Engineering – Leitinitiative zur Zukunft des Engineering und Innovationsstandorts Deutschland.* München. Abgerufen am 20. Februar 2022 von [advanced-systems-engineering: https://www.advanced-systems-engineering.de/ASE_Strategie.pdf](https://www.advanced-systems-engineering.de/ASE_Strategie.pdf)
- Banholzer, V. M. (2021). Ist „Industrie 4.0“ gleich „Industry 4.0“? Die Bedeutung kultureller Kontexte für die internationale Wirtschaftskommunikation: Technologiebezeichnungen in Deutschland und Norwegen im Vergleich. In S. Matrisciano, E. Hoffmann, & E. Peters, *Mobilität - Wirtschaft - Kommunikation.* Wiesbaden: Springer Fachmedien. doi:10.1007/978-3-658-32370-7_5
- Bell, D. (1996). *Die nachindustrielle Gesellschaft.* Frankfurt/ Main: Campus Verlag.
- BioNTech Europe GmbH. (15. 09 2021). *So funktioniert die Herstellung von mRNA-Impfstoffen.* Abgerufen am 23. Februar 2023 von [mrnaverstehen.biontech: https://mrnaverstehen.biontech.de/de/startseite/so-funktioniert-die-herstellung-von-mrna-impfstoffen.html](https://mrnaverstehen.biontech.de/de/startseite/so-funktioniert-die-herstellung-von-mrna-impfstoffen.html)
- Bitkom. (25. Juli 2014). *Investition in Industrie 4.0 in Deutschland in den Jahren 2013 bis 2020.* Abgerufen am 27. Februar 2023 von [statista: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/372846/umfrage/investition-in-industrie-40-in-deutschland/](https://de.statista.com/statistik/daten/studie/372846/umfrage/investition-in-industrie-40-in-deutschland/)

- Bitkom. (24. Mai 2022). *Welche Bedeutung hat Industrie 4.0 für Ihr Unternehmen?* Abgerufen am 23. Februar 2023 von statista:
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/830769/umfrage/bedeutung-von-industrie-40-in-deutschland/?locale=de>
- Bluma, L., Kaupaité, L., & Arndt, J. (09. Juni 2021). *moiadev.medium*. Abgerufen am 20. Februar 2022 von Hackathon at MOIA — where the sky's the limit:
<https://moiadev.medium.com/hackathon-at-moia-where-the-skys-the-limit-b2294313fe46>
- BMKW, B. f. (Hrsg.). (11. Januar 2022). *Struktur und Organisation der Plattform Industrie 4.0*. Abgerufen am 27. Februar 2023 von plattform-i40: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Bilder/grafik-plattform-4-0.html>
- BMSGPK, B. f. (Hrsg.). (26. 03 2021). *Die verschiedenen Arten von Impfstoffen*. Abgerufen am 23. Februar 2023 von Gesundheit.gv:
<https://www.gesundheit.gv.at/leben/gesundheitsvorsorge/impfungen/impfstoffarten>
- BMU, B. f. (Hrsg.). (2008). *Die Dritte industrielle Revolution – Aufbruch in ein ökologisches Jahrhundert. Dimensionen und Herausforderungen des industriellen und gesellschaftlichen Wandels*. Abgerufen am 27. Februar 2023 von boell:
https://www.boell.de/sites/default/files/assets/boell.de/images/download_de/oekologie/broschuere_dritte_industr_rev.pdf#014
- BMWK, B. f. (Hrsg.). (2022). *Hintergrund zur Plattform Industrie 4.0*. Abgerufen am 27. Februar 2023 von plattform-i40: <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/DE/Plattform/Hintergrund/hintergrund.html>
- Bosch.IO GmbH. (kein Datum). *bosch-connected-world*. Abgerufen am 20. Februar 2023 von One of Europe's largest AIoT hackathons: <https://bosch-connected-world.com/hackathon/>
- Bruderer, H. (2012). Die Maschinen von Charles Babbage, Alan Turing und John von Neumann. In H. Bruderer, *Konrad Zuse und die Schweiz*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag. doi:10.1524/9783486716658.43
- Brugger, R. (2009). *Der IT Business Case: Kosten erfassen und analysieren, Nutzen erkennen und quantifizieren, Wirtschaftlichkeit nachweisen und realisieren* (2. Ausg.). Berlin Heidelberg: Springer Verlag. doi:10.1007/978-3-540-93858-3
- BSI, Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. (25. April 2016). *Sicherheitsanalyse OPC UA*. Abgerufen am 14. Februar 2023 von bsi.bund:
https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/Studien/OPCUA/OPCUA.pdf?__blob=publicationFile&v=2

- Budäus, D. (1990). Industriebetriebe und Industriezweige. In H. Jacob, *Industriebetriebslehre* (4. Ausg.). Gabler Verlag. doi:10.1007/978-3-322-93177-1
- Buhr, D., & Stehnken, T. (2018). *Industrie 4.0 und europäische Innovationspolitik*. Bonn: Friedrich-Ebert-Stiftung. Abgerufen am 23. Januar 2023 von <https://library.fes.de/pdf-files/wiso/14207.pdf>
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (02. März 2016). *plattform-i40*. Abgerufen am 25. Januar 2023 von Plattform Industrie 4.0 und das Industrial Internet Consortium vereinbaren Kooperation: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2016/2016-03-02-kooperation-iic.html>
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (kein Datum). *plattform-i40*. Abgerufen am 25. Januar 2023 von Deutsch Chinesische Industrie 4.0 Kooperation: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Dossiers/china.html>
- Cao, L. (2017). Data Science: A Comprehensive Overview. *ACM Computing Surveys*, 50(3), S. 42. doi:10.1145/3076253
- Claus, A. M., & Wiese, B. S. (27. Mai 2021). Interdisziplinäre Kompetenzen: Modellentwicklung und diagnostische Zugänge. *Gruppe. Interaktion. Organisation. Zeitschrift für Angewandte Organisationspsychologie (GIO)*, S. 279-288. doi:10.1007/s11612-021-00578-6
- Crafts, N. F. (01. Dezember 1997). The Human Development Index and changes in standards of living: Some historical comparisons. *European Review of Economic History*, 1(3), S. 299-322. doi:10.1017/S1361491697000142
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2015). *DIN EN IEC 9000:2015-11: Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe*. Beuth. Abgerufen am 02. Februar 2023
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2016). *DIN SPEC 91345:2016-04 Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0)*. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Abgerufen am 04. November 2022
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2022). *DIN EN IEC 62832-1:2022-05 Industrielle Automatisierungs- und Leittechnik - Grundstruktur der digitalen Fabrik - Teil 1: Allgemeine Grundsätze*. Beuth. doi:10.31030/3318392
- Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology. (19. April 2016). *Overview of European Initiatives on Digitising Industry*. Abgerufen am 28. Februar 2023 von europa: https://ec.europa.eu/information_society/newsroom/image/document/2016-16/overview_of_digitising_industry_with_links_15202.pdf

- Dörner, D. (1984). Denken, Problemlösen und Intelligenz. *Psychologische Rundschau*, XXXV(1), S. 10-20. Abgerufen am 23. Februar 2023 von https://www.researchgate.net/profile/Dietrich-Doerner/publication/265884562_Denken_Problemlosen_und_Intelligenz/links/576cfeaa08ae3c5c932e0885/Denken-Problemlösen-und-Intelligenz.pdf
- Ebbinghaus, H. (1885). *Über das Gedächtnis. Untersuchungen zur experimentellen Psychologie*.
- Fährlich, K.-P., & Opitz, M. (2006). Service Engineering - Entwicklungspfad und Bild einer jungen Disziplin. In H.-J. Bullinger, & A.-W. Scheer, *Service Engineering* (S. 86-112). Berlin Heidelberg: Springer. doi:10.1007/3-540-29473-2_4
- Fourastié, J. (1954). *Die große Hoffnung des zwanzigsten Jahrhunderts* (3. Ausg.). Köln-Deutz: Bund-Verlag.
- Frimmer, V. (20. 12 2020). *Bei Impfstoffproduktion muss alles passen*. Abgerufen am 23. Februar 2023 von n-tv: <https://www.n-tv.de/wissen/Bei-Impfstoffproduktion-muss-alles-passen-article22245002.html>
- Frost, J. (14. Februar 2018). *wirtschaftslexikon.gabler*. (S. F. GmbH, Herausgeber) Abgerufen am 31. Januar 2023 von Wissensmanagement: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/wissensmanagement-47468/version-270732>
- Geary, F. (1982). The Cause of the Industrial Revolution and 'Single Factor' Arguments: an Assessment. *Journal of European Economic History*. Abgerufen am 09. September 2022 von <https://www.proquest.com/openview/638a22c8ee8fa52e0ca3b85534dd8874/1?cbl=1819397&pq-origsite=gscholar&parentSessionId=0Da7pxHNdEMr3FzbXl10PETNOOYhjd71zKxuT80Wizk%3D>
- Gerrig, R. (2018). *Psychologie* (21. Ausg.). (T. Dörfler, & J. Roos, Hrsg.) Pearson Deutschland GmbH.
- Giersberg, G. (10. Oktober 2020). *faz*. Abgerufen am 01. März 2023 von „Nur ökologische Waren einführen“: <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/zwei-praesident-kegel-ueber-die-deutsche-elektroindustrie-16994539.html>
- Haberfellner, R., Nagel, P., Becker, M., Büchel, A., & von Massow, H. (1999). *Systems Engineering: Methodik und Praxis* (10. Ausg.). (W. Daenzer, & F. Huber, Hrsg.) Zürich: Industrielle Organisation.
- Hahn, H.-W. (2011). *Die Industrielle Revolution in Deutschland*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag. doi:10.1524/9783486702491

- Haneke, U., Trahasch, S., Zimmer, M., & Felden, C. (2019). *Data Science: Grundlagen, Architekturen und Anwendungen*. Heidelberg: dpunkt.verlag.
- Haupt, R. (2000). *Industriebetriebslehre*. Gabler Verlag. doi:10.1007/978-3-322-84572-6
- Heim, E., Matiz, D., & Ehrat, M. (Dezember 2014). Offshoring oder Reshoring? Aktuelle Trends und eine Entscheidungshilfe für KMU in Hochlohnländern. *ZWF Zeitschrift fuer Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*(109), S. 920-922. doi:10.3139/104.111253
- Hevner, A. R., March, S. T., Park, J., & Ram, S. (März 2004). Design Science in Information Systems Research. *MIS Quarterly*(28.1), S. 75-105.
- Hildebrand, T., Mäding, K., Günther, U., & Müller, E. (2005). *Plug+Produce: Gestaltungsstrategien für die wandlungsfähige Fabrik*. Chemnitz: Institut für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme, Technische Universität.
- Hirsch-Kreinsen, H., Kubach, U., Stark, R., von Wichert, G., Litsche, S., Sedlmeir, J., & Steglich, S. (2022). *Blinde Flecken in der Umsetzung von Industrie 4.0 - identifizieren und verstehen*. (F. d.-D. Technikwissenschaften, Hrsg.) München. doi:10.48669/fb40_2022-1
- Hoffmann, D., Nowacki, N. S., Biffl, S., Kiesling, E., Meixner, K., & Lüder, A. (2023). Interdisciplinary Production Risk Exploration: A Grounded Approach to Integrate Data- and Knowledge-Driven Analytics. *submitted to: 56th CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP CMS)*. South Africa.
- Hofmann, S. (02. 12 2020). *Covid, Zika, Krebs: Wie die mRNA-Technologie den Kampf gegen Krankheiten revolutioniert*. Abgerufen am 23. Februar 2023 von Handelsblatt: <https://www.handelsblatt.com/technik/medizin/kampf-gegen-infektionskrankheiten-covid-zika-krebs-wie-die-mrna-technologie-den-kampf-gegen-krankheiten-revolutioniert/26678674.html?ticket=ST-312435-kMGd7XxMyy71QreJ6VLJ-cas01.example.org>
- Hohls, R. (2005). Über die Werkbank zur tertiären Zivilisation. In R. Hohls, I. Schröder, & H. Siegrist, *Europa und die Europäer. Quellen und Essays zur modernen europäischen Geschichte*. Stuttgart: Franz Steiner Verlag. doi:10.25162/9783515113274
- Inhärenz*. (kein Datum). Abgerufen am 02. Februar 2023 von dwds: <https://www.dwds.de/wb/Inh%C3%A4renz>
- Inmon, W. H. (2002). *Building the Data Warehouse* (3. Ausg.). New York: John Wiley & Sons, Inc.

- International Electrotechnical Commission (IEC). (2010). *IEC 62443-2-1:2010 Industrial communication networks –Network and system security –Part 2-1: Establishing an industrial automation and control system security program*. Genf.
- International Federation of Robotics. (28. Oktober 2021). *IFR presents World Robotics 2021 reports*. Pressemitteilung. Abgerufen am 24. Februar 2023 von ifr: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/robot-sales-rise-again>
- International Federation of Robotics. (05. Dezember 2022). *China überholt bei der Roboterdichte die USA*. Pressemitteilung. Abgerufen am 24. Februar 2023 von China überholt bei der Roboterdichte die USA: https://ifr.org/downloads/press2018/2022-DEC-05-Presemeldung_Roboterdichte_%281%29.pdf
- International Organization of Standardization. (2015). *ISO 9001:2015-09: Quality management systems – Requirements* (5. Ausg.). Genf.
- Isermann, R. (2008). *Mechatronische Systeme: Grundlagen* (2. Ausg.). Berlin Heidelberg: Springer Verlag. doi: 10.1007/978-3-540-32512-3
- Jakoby, W. (2019). *Qualitätsmanagement für Ingenieure: Ein praxisnahes Lehrbuch für die Planung und Steuerung von Qualitätsprozessen*. Wiesbaden: Springer Vieweg. doi:10.1007/978-3-658-26596-0
- Jasperneite, J. (2012). Alter Wein in neuen Schläuchen? *Computer&Automation*(12), S. 24-28.
- Kagermann, H., Anderl, R., Gausemeier, J., Schuh, G., & Wahlster, W. (Hrsg.). (2016). *Industrie 4.0 im globalen Kontext: Strategien der Zusammenarbeit mit internationalen Partnern*. München: Herbert Utz Verlag. Von <https://www.acatech.de/publikation/industrie-4-0-im-globalen-kontext-strategien-der-zusammenarbeit-mit-internationalen-partnern/> abgerufen
- Kagermann, H., Lukas, W.-D., & Wahlster, W. (01. April 2011). Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution. *VDI Nachrichten*, 2. Abgerufen am 27. Februar 2023 von https://www-live.dfki.de/fileadmin/user_upload/DFKI/Medien/News_Media/Presse/Presse-Highlights/vdinach2011a13-ind4.0-Internet-Dinge.pdf
- Kaiser, L. (2014). *Rahmenwerk zur Modellierung einer plausiblen Systemstruktur mechatronischer Systeme* (Bd. 327). Paderborn: Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts. Abgerufen am 01. März 2023 von <https://d-nb.info/1048616061/34>
- Karaki, M. (2023). *Development of an Industrie 4.0 oriented methodology of the requirements elicitation process as an example of the stator manufacturing*. Braunschweig.

- Karch, S., Lüder, A., Listl, C., Nowacki, N. S., Kardo, H., Werner, R., . . . Müller, S. (2023). Lean Engineering - Identifying muda in engineering chains. *submitted to: 56th CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP CMS)*. South Africa.
- Kiesewetter, H. (1996). *Das einzigartige Europa: zufällige und notwendige Faktoren der Industrialisierung*. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht.
- Kiesewetter, H. (2004). *Industrielle Revolution in Deutschland: Regionen als Wachstumsmotoren*. Stuttgart: Franz Steiner Verlag.
- Kletti, J., & Rieger, J. (2022). Die Bausteine für die perfekte Produktion. In J. Kletti, & J. Rieger, *Die perfekte Produktion* (S. 51-135). Wiesbaden: Springer Fachmedien. doi:10.1007/978-3-658-39024-2
- Kominek, D. (Oktober 2017). *opcconnect.opcfoundation*. Abgerufen am 14. Februar 2023 von Should I Use OPC UA or MQTT or AMQP?: <https://opcconnect.opcfoundation.org/2017/10/should-i-use-opc-ua-mqtt-amqp/>
- Krcmar, H. (2015). *Informationsmanagement* (6. Ausg.). Wiesbaden: Springer Gabler.
- Kropatschek, S., Gert, O., Ayatollahi, I., Meixner, K., Kiesling, E., Steigberger, A., . . . Biffel, S. (2022). Designing a Digital Shadow for Efficient, Low-Delay Analysis of Production Quality Risk. *2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. Stuttgart. doi:10.1109/ETFA52439.2022.9921582
- Lam, A. (Mai 2000). Tacit Knowledge, Organizational Learning and Societal Institutions: An Integrated Framework. *Organization Studies*, 3(21), S. 487-513. doi:10.1177/0170840600213001
- Lüder, A., Steininger, H., & Goltz, D. (2023). Quo vadis Automation?: Trends für das Engineering von Automatisierungssystemen. *at - Automatisierungstechnik*, 1(71), 6-15. doi:10.1515/auto-2022-0102
- Meixner, K., Musil, J., Lüder, A., Winkler, D., & Biffel, S. (2022). A Coordination Artifact for Multi-disciplinary Reuse in Production Systems Engineering. *2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. Stuttgart. doi:10.1109/ETFA52439.2022.9921586
- Moyne, J., & Iskandar, J. (2017). *Big data analytics for smart manufacturing: Case studies in semiconductor manufacturing* (5(3) Ausg.). Processes. doi:10.3390/pr5030039
- Nonaka, I., & Takeuchi, H. (1997). *Die Organisation des Wissens*. Frankfurt/Main, New York: Campus.

- North, K. (2021). *Wissensorientierte Unternehmensführung* (7. Ausg.). Wiesbaden: Springer Fachmedien. doi:10.1007/978-3-658-32771-2
- Nowacki, N. S., Müller, R. K., Grossmann, D., & Lüder, A. (2023). Approach for identifying data usage information objects for the later implementation in production environments. *Proceedings of the 2023 10th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEAEU '23)*. Rome: Association for Computing Machinery. doi:10.1145/3587889.3587915
- Nowacki, N. S., Ritter, K.-C., Lüder, A., & Behnert, A.-K. (2021). Changing a running system: A guideline for retrofitting brownfield manufacturing systems. *26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. Vasteras. doi:10.1109/ETFA45728.2021.9613198
- O'Leary, D. E. (01. März 1998). Enterprise Knowledge Management. (I. C. Press, Hrsg.) *Computer*, 3(31), S. 54-61. doi:10.1109/2.660190
- OPC Foundation. (06. Februar 2018). *OPC 10000-14: UA Part 14: PubSub*. Abgerufen am 02. März 2023 von reference.opcfoundation: <https://reference.opcfoundation.org/v104/Core/docs/Part14/>
- OPC Foundation. (01. November 2022). *reference.opcfoundation*. Abgerufen am 14. Februar 2023 von OPC 10000-5: UA Part 5: Information Model: <https://reference.opcfoundation.org/Core/Part5/v105/docs/>
- Oswald, W. D. (2008). Gedächtnis. In W. D. Oswald, G. Gatterer, & U. M. Fleischmann, *Gerontopsychologie* (2. Ausg., S. 43-58). Wien: Springer Verlag. doi:10.1007/978-3-211-78390-0_4
- Peschke, F., & Eckardt, C. (2019). *Flexible Produktion durch Digitalisierung: Entwicklung von Use Cases*. München: Carl Hanser Verlag.
- Pfeifer, W. (1993). *Qualität*. Abgerufen am 02. Februar 2023 von dwds: <https://www.dwds.de/wb/etymwb/Qualit%C3%A4t>
- Picot, A. (1988). Die Planung der Unternehmensressource "Information". 2. *Internationales Management-Symposium "Erfolgsfaktor Information"* (S. 223-250). Frankfurt: Wirtschaftswoche/Diebold Deutschland GmbH. Abgerufen am 03. März 2023 von <https://epub.ub.uni-muenchen.de/7062/1/7062.pdf>
- Plattform Industrie 4.0. (2020). *Verwaltungsschale in der Praxis*. (B. f. BMWi, Hrsg.) Abgerufen am 28. Februar 2023 von <https://www.plattform->

i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/2020-verwaltungsschale-in-der-praxis.pdf?__blob=publicationFile&v=3

Plattform Industrie 4.0. (2022). *Details of the Asset Administration Shell: Part 1 - The exchange of information between partners in the value chain of Industrie 4.0* (3. Ausg.).

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Abgerufen am 10. Februar 2022 von https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Details_of_the_Asset_Administration_Shell_Part1_V3.pdf?__blob=publicationFile&v=10

Pohl, K., & Rupp, C. (2011). *Basiswissen Requirements Engineering*. Heidelberg: dpunkt Verlag GmbH.

Pollert, A., Kirchner, B., & Polzin, J. M. (2008). *Duden, Wirtschaft von A bis Z : Grundlagenwissen für Schule und Studium, Beruf und Alltag* (3. Ausg.). Mannheim Leipzig Wien Zürich: Dudenverlag.

Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen University. (Oktober 2022). *pem.rwth-aachen*. Abgerufen am 15. Februar 2023 von Produktionsprozess eines Hairpin-Stators: https://www.pem.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaabsdqzyt

Rahlf, T. (Hrsg.). (2015). *Deutschland in Daten*. Bonn: Bundeszentrale für politische Bildung. Abgerufen am 27. Februar 2023 von Deutschland in Daten: <https://www.bpb.de/shop/buecher/zeitbilder/211002/deutschland-in-daten/>

Rechenberg, P., & Pomberger, G. (Hrsg.). (2006). *Informatik-Handbuch* (4. Ausg.). München Wien: Carl Hanser Verlag.

Riedel, A., Masuch, M., Weigelt, M., Gläbel, T., Kühl, A., Reinstein, S., & Franke, J. (2018). Challenges of the hairpin technology for production techniques. *21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)* (S. 2471-2476). Jeju: IEEE. doi:10.23919/ICEMS.2018.8549105

Rifkin, J. (17. Januar 2016). Dritte industrielle Revolution. Zukunftsökonom Rifkin: "Die USA werden in Zukunft nicht mithalten können". (M. Voss, Interviewer) Focus Online. Abgerufen am 03. März 2023 von https://www.focus.de/finanzen/news/unternehmen/dritte-industrielle-revolution-zukunftsoekonom-rifkin-die-usa-werden-nicht-mithalten-koennen-ein-zehntel-der-ressourcen_id_5216953.html

- Röhl, K.-H., Bolwin, L., & Hüttl, P. (2021). *Datenwirtschaft in Deutschland: Wo stehen die Unternehmen in der Datennutzung und was sind ihre größten Hemmnisse?* (B. d. e.V., Hrsg.) Abgerufen am 24. Februar 2023 von <https://bdi.eu/publikation/news/datenwirtschaft-in-deutschland/>
- Ropohl, G. (2009). *Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik* (3. Ausg.). Karlsruhe: KIT Scientific Publishing. Abgerufen am 03. März 2023 von <http://books.openedition.org/ksp/3003>
- Roser, M. (2014). *Human Development Index (HDI)*. Abgerufen am 27. Februar 2023 von ourworldindata: <https://ourworldindata.org/human-development-index>
- Sammet, J. (April 1992). Farewell to Grace Hopper - End of an Era! *Communications of the ACM*, 35(4), S. 128-131. doi:10.1145/129852.214846
- Scheer, A.-W. (1995). *Wirtschaftsinformatik* (5. Ausg.). Berlin Heidelberg: Springer Verlag. doi:10.1007/978-3-662-10955-7
- Schockert, S., & Herzwurm, G. (2015). Das Business setzt die Prioritäten?! In M. Engstler, M. Fazal-Baqaie, E. Hanser, M. Mikusz, & A. Volland (Hrsg.), *Projektmanagement und Vorgehensmodelle 2015 (PVM 2015)* (S. 151-158). Bonn: Gesellschaft für Informatik. Abgerufen am 03. März 2023 von <https://dl.gi.de/bitstream/handle/20.500.12116/1986/lnip-250-komplett.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Schuh, G., Anderl, R., Dumitrescu, R., Krüger, A., & ten Hompel, M. (Hrsg.). (2020a). *Industrie 4.0 Maturity Index. Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten - UPDATE 2020 - (acatech STUDIE)*. München. Abgerufen am 24. Februar 2023 von <https://www.acatech.de/publikation/industrie-4-0-maturity-index-update-2020/>
- Schuh, G., Anderl, R., Dumitrescu, R., Krüger, A., & ten Hompel, M. (Hrsg.). (2020b). *Der Industrie 4.0 Maturity Index in der betrieblichen Anwendung. Aktuelle Herausforderungen, Fallbeispiele und Entwicklungstrends (acatech KOOPERATION)*. München. Abgerufen am 27. Februar 2023 von <https://www.acatech.de/publikation/der-industrie-4-0-maturity-index-in-der-betrieblichen-anwendung/>
- Seckler, C., Mauer, R., & vom Brocke, J. (2021). Design science in entrepreneurship: Conceptual foundations and guiding principles. *Journal of Business Venturing Design*. doi:10.1016/j.jbvd.2022.100004
- Siemens AG. (September 2017). *SIMATIC NET: Network management Diagnostics and configuration with SNMP*. Abgerufen am 09. Februar 2023 von cache.industry.siemens.com

https://cache.industry.siemens.com/dl/files/062/103949062/att_929371/v1/DH_SNMP_76.pdf

Spur, G. (1979). *Produktionstechnik im Wandel*. München Wien: Carl Hanser Verlag.

Statistisches Bundesamt (Hrsg.). (25. Mai 2022). *Erwerbstätige im Inland nach Wirtschaftssektoren*. Abgerufen am 29. September 2022 von destatis: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Konjunkturindikatoren/Lange-Reihen/Arbeitsmarkt/lrerw13a.html;jsessionid=9CA1932D1EB2CBCF423817DC316EA90C.live731#fussnote-1-242416>

Ulrich, H., & Probst, G. (1991). *Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln: Ein Brevier für Führungskräfte* (3. Ausg.). Bern: Paul Haupt Verlag.

United Nations Development Programme (Hrsg.). (01. Januar 1990). *Human Development Report 1990*. New York Oxford: Oxford University Press. Abgerufen am 27. Februar 2023 von undp: <https://hdr.undp.org/system/files/documents/hdr1990encompletenostatspdf.pdf>

Vajna, S., Weber, C., Zeman, K., Hehenberger, P., Gerhard, D., & Wartzack, S. (2018). *CAX für Ingenieure: Eine praxisbezogene Einführung* (3. Ausg.). Springer Vieweg. doi:10.1007/978-3-662-54624-6

van Beek, P., Smith, J. R., Ebrahimi, T., Suzuki, T., & Askelof, J. (2003). Metadata-Driven Multimedia Access. *IEEE Signal Processing Magazine*, 20(2), S. 40-52. doi:10.1109/MSP.2003.1184338

VDI e. V. (Hrsg.). (2004). *VDI 2206:2004-06: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme (zurückgezogen)*. Düsseldorf: Beuth.

VDI e. V. (Hrsg.). (2015). *VDI/VDE 3682 Blatt 1:2015-05 Formalisierte Prozessbeschreibungen - Konzept und grafische Darstellung*. Düsseldorf: Beuth.

VDI e. V. (Hrsg.). (2018). *VDI 3633:2018-05 Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Begriffe*. Düsseldorf: Beuth.

VDI e. V. (Hrsg.). (2021). *VDI/VDE 2206:2021-11 Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme*. Düsseldorf: Beuth.

VDMA e. V. (Hrsg.). (kein Datum). *vdma*. Abgerufen am 21. März 2023 von OPC UA Companion Specifications: <https://www.vdma.org/catalogs>

VDMA Forum Industrie 4.0. (2020). *Leitfaden Retrofit für Industrie 4.0: Neuer Nutzen mit vorhandenen Maschinen*. VDMA Verlag EmbH. Von

- https://www.vdma.org/documents/34570/15610928/Leitfaden_I40_Retrofit_DE_FINAL.pdf abgerufen
- Vogel-Heuser, B. (24. Januar 2017). "Viele glauben, Industrie 4.0 kann man kaufen". (S. Reiffert, Interviewer, & Technische Universität München, Herausgeber) Abgerufen am 27. Februar 2023 von <https://www.tum.de/die-tum/aktuelles/pressemitteilungen/detail/33648>
- von der Dovenmühle, T. (2018). *Integration externer Dienstleister in den Leistungserstellungsprozess der betrieblichen Informationsverarbeitung*. Shaker.
- Walenza-Slabe, E. (Hrsg.). (2017). *Smart Factory Applications in Discrete Manufacturing*. Industrial Internet Consortium. doi:IIC:WHT:IS2:V1.0:PB:20170222
- Wang, B., Tao, F., Fang, X., Liu, C., Liu, Y., & Freiheit, T. (2021). Smart Manufacturing and Intelligent Manufacturing: A Comparative Review. *Engineering*, 7(6), S. 738-757. doi:10.1016/j.eng.2020.07.017
- Weihls, C., & Ickstadt, K. (2019). Ist Data Science mehr als Statistik? Ein Blick über den Tellerrand. In C. Weihls, & W. Krämer, *Faszination Statistik* (S. 203-210). Berlin Heidelberg: Springer Verlag GmbH. doi:10.1007/978-3-662-60562-2_26
- Winkler, D., Korobeinykov, A., Novák, P., Lüder, A., & Biffel, S. (2021). Big Data Needs and Challenges in Smart Manufacturing: An Industry-Academia Survey. *2021 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. Vasteras: IEEE. doi:10.1109/ETFA45728.2021.9613600
- Wirdemann, R., Ritscher, A., & Mainusch, J. (2022). *Scrum mit User Stories* (4. Ausg.). München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.
- Wissenschaftliche Dienste Deutscher Bundestag. (26. September 2016). *Aktueller Begriff Industrie 4.0*. Abgerufen am 27. Februar 2023 von bundestag: <https://www.bundestag.de/resource/blob/474528/cae2bfac57f1bf797c8a6e13394b5e70/industrie-4-0-data.pdf>

Die Liste der Veröffentlichungen, die unter Mitwirkung der Autorin, im Zusammenhang mit diesem Dissertationsvorhaben entstanden sind:

(Nowacki, Müller, Grossmann, & Lüder, 2023)

(Nowacki, Ritter, Lüder, & Behnert, 2021)

(Karch, et al., 2023)

(Hoffmann, et al., 2023)

Von der Autorin betreute Abschlussarbeiten, die im Zusammenhang mit diesem Dissertationsvorhaben entstanden sind:

(Karaki, 2023)

A **Detaillierung der Informationscluster**

Übersetzung der Informationscluster von MOYNE ET AL. in die deutsche Sprache (vgl. Moyne & Iskandar, 2017).

Virtual Metrology (VM):

Die Technologie der Vorhersage von nachgelagerten, (messbaren oder nicht messbaren) Variablen der Messtechnik unter Verwendung von Prozess- und Produkt-Zustandsinformationen, die vorgelagerte Mess- und/oder Sensordaten enthalten können. Begriffe wie die „virtual sensing“ und „sensor fusion“ werden ebenfalls verwendet, um diese Fähigkeit zu beschreiben.

Predictive Scheduling:

Die Technologie zur Nutzung aktueller und voraussichtlicher zukünftiger Informationen über den Zustand von Werkzeugen und Fabriken, Fähigkeiten, Zeitplan, Versand und Aufträge zur Vorhersage und Verbesserung der Planung eines Systems (Werkzeug, Gruppe von Werkzeugen, Fabrik, usw.)

Statistical Process Control (SPC):

Die Technik der Anwendung statistischer Methoden zur Analyse von Prozess- oder Produktmessgrößen, um geeignete Maßnahmen zu ergreifen, um einen Zustand der statistischen Kontrolle zu erreichen und aufrechtzuerhalten für eine kontinuierliche Verbesserung der Prozessfähigkeit.

Fault Prediction (or prognosis) (FP):

Die Technik der Überwachung und Analyse von Schwankungen in Prozessdaten zur Vorhersage von Anomalien.

Fault Classification (FC):

Die Technik zur Bestimmung der Ursache eines Fehlers, nachdem dieser entdeckt wurde.

Advanced Process Control (APC):

Die Fertigungsdisziplin zur Anwendung von Kontrollstrategien und/oder von Analyse- und Berechnungsmechanismen zur Empfehlung optimierter Maschineneinstellungen sowie Fehlererkennung und deren Ursachenermittlung.

Yield Prediction:

Die Technologie zur Überwachung von Informationen über die Gesamte Fertigung (z.B. Werkzeuge und Messtechnik) zur Vorhersage des Prozesses oder dem Ergebnis am Ende der Fertigungslinie.

Predictive Maintenance (PdM):

Die Technologie zur Nutzung von Informationen über den Prozess- und Anlagenzustand, um vorherzusagen, wann ein Werkzeug oder ein bestimmtes Bauteil in einem Werkzeug gewartet werden muss. Diese Vorhersage wird als Information zur Verbesserung der Wartungsverfahren genutzt. Dies bedeutet, dass ungeplante Ausfallzeiten vorhergesagt und vermieden werden können. PdM-Lösungen, wie sie hier definiert sind, betreffen den gesamten Wartungszyklus, von der Vorhersage von Wartungsarbeiten über die Wiederherstellung nach Wartungsereignissen bis hin zur Rückkehr zur Produktion.

Equipment Health Monitoring (EHM):

Die Technologie zur Überwachung von Werkzeugparametern, um den Zustand des Werkzeugs in Abhängigkeit von der Abweichung vom Normalverhalten zu bewerten. EHM ist nicht notwendigerweise prädiktiv, aber oft eine Komponente von prädiktiven Systemen.

Run-to-Run (R2R) Control:

Die Technik der Änderung von Rezeptparametern oder der Auswahl von Kontrollparametern zwischen den Läufen zur Verbesserung der Verarbeitungsleistung. Ein "Lauf" kann eine Charge, ein Los oder eine einzelne Produktinstanz sein.

Fault Detection (FD):

Die Technik der Überwachung und Analyse von Schwankungen in Werkzeug- und/oder Prozessdaten, um Anomalien zu erkennen.

Fault Detection and Classification (FDC):

Eine Kombination aus FD und FC.

B Benchmarkkriterien für die Adapterauswahl

Die folgenden Inhalte beschreiben einen beispielhaften Ausschnitt von Benchmarkkriterien für die Adapterauswahl. Diese Liste bildet ein Abbild der Best Practice und kann beliebig erweitert werden. Es ist anwendungsfallspezifisch zu untersuchen, welche dieser Kriterien im Industriebetrieb eine Relevanz aufweisen.

OT-orientierte Benchmarkkriterien:

- Kompatibilität mit der zu adaptierenden Technologie: Artikelbezeichnung, Artikelnummer, Hardware- und Softwarestand der zu adaptierenden Technologie.
- Proprietäre Protokolle: Abgleich der unterstützten (Feldbus-)Protokolle.
- Abtastrate: Abgleich der benötigten mit der realisierbaren Abtastrate.
- Datenmenge: Das Maximum der simultan ausles- und übertragbaren Variablen.
- Informationsmodelle: Abprüfen der Möglichkeit, ob definierte Betriebsstandards zu Informationsmodellen eingelesen können um ein anschließendes Datenmapping zu vermeiden.
- Zugriff auf Numerical Control-Variablen: Abprüfen der Möglichkeit im Falle der Notwendigkeit.
- Wechselspeicher: Adapterkonfiguration kann auf einem lokalen Datenträger abgespeichert werden, um einen schnellen Hardwareaustausch im Falle eines Ausfalls zu ermöglichen.
- Pufferspeicher: Im Falle einer Störung der Kommunikationsverbindung gehen die zu gewinnenden Daten nicht verloren, sondern können bei der Wiederherstellung der Verbindung versandt werden.
- Schnittstellenanzahl: Je nach verfügbaren Schnittstellen können ggf. mehrere Datenquelle angebunden werden.
- Zustandsüberwachung: Monitoring der CPU-Belastung

IT-orientierte Benchmarkkriterien:

- Unterstützte Datentypen: Ggf. sind Betriebsvorgaben einzuhalten.
- Unterstützte Netzwerkprotokolle: Ggf. sind auch hier Betriebsstandards einzuhalten.
- Verbindung zu einer externen Hersteller-Cloud: Die Notwendigkeit zur Nutzung einer externen Cloud kann ein Ausschlusskriterium des anfragenden Betriebes darstellen.
- Servertechnologien: Abgleich der ggf. notwendigen Servertechnologien mit den Betriebsvorgaben.
- Open Source: Prüfung der Open Source Bedingungen.
- Zentrales Device-Management: Kann der Adapter zentral verwaltet werden, um bspw. den manuellen Aufwand einer Softwareverteilung möglichst gering zu gestalten.
- Support: Gewährleistung der Unterstützungsleistung im Falle einer notwendigen Fehlerbehebung.

IT-Sicherheitsorientierte Benchmarkkriterien:

- Absicherung der physikalischen Sicherheit und Zugriffsschutz
- Kommunikationsverschlüsselung: Unterstützung des aktuellsten Verschlüsselungsstandards.
- Überwachung und Protokollanalyse: Zur präventiven Fehlerbehebung und Langzeitanalyse.
- Möglichkeit der Systemhärtung: Zur Absicherung des Produktionsprozesses.

Wirtschaftlich-orientierte Benchmarkkriterien:

- Einmalkosten: Für Hardware und/ oder Software, Aufwand der Inbetriebnahme, etc.
- Wiederkehrende Kosten: bspw. Lizenzkosten.
- Anzahl der verfügbaren Schnittstellen: Zur gleichzeitigen Anbindung mehrerer Datenquellen.

- Wiederverwendung vorhandener Systeme: Können vorhandene Systeme wiederverwendet werden oder müssen zusätzliche, neue Lösungen beschafft werden?
- Wartungszyklen: Bindung von personellen Kapazitäten.
- Produktkomplexität: Müssen die betriebsinternen Fachkräfte für den Umgang mit dem Produkt geschult werden?

C Informationsbedarfsmodellierung in PPR

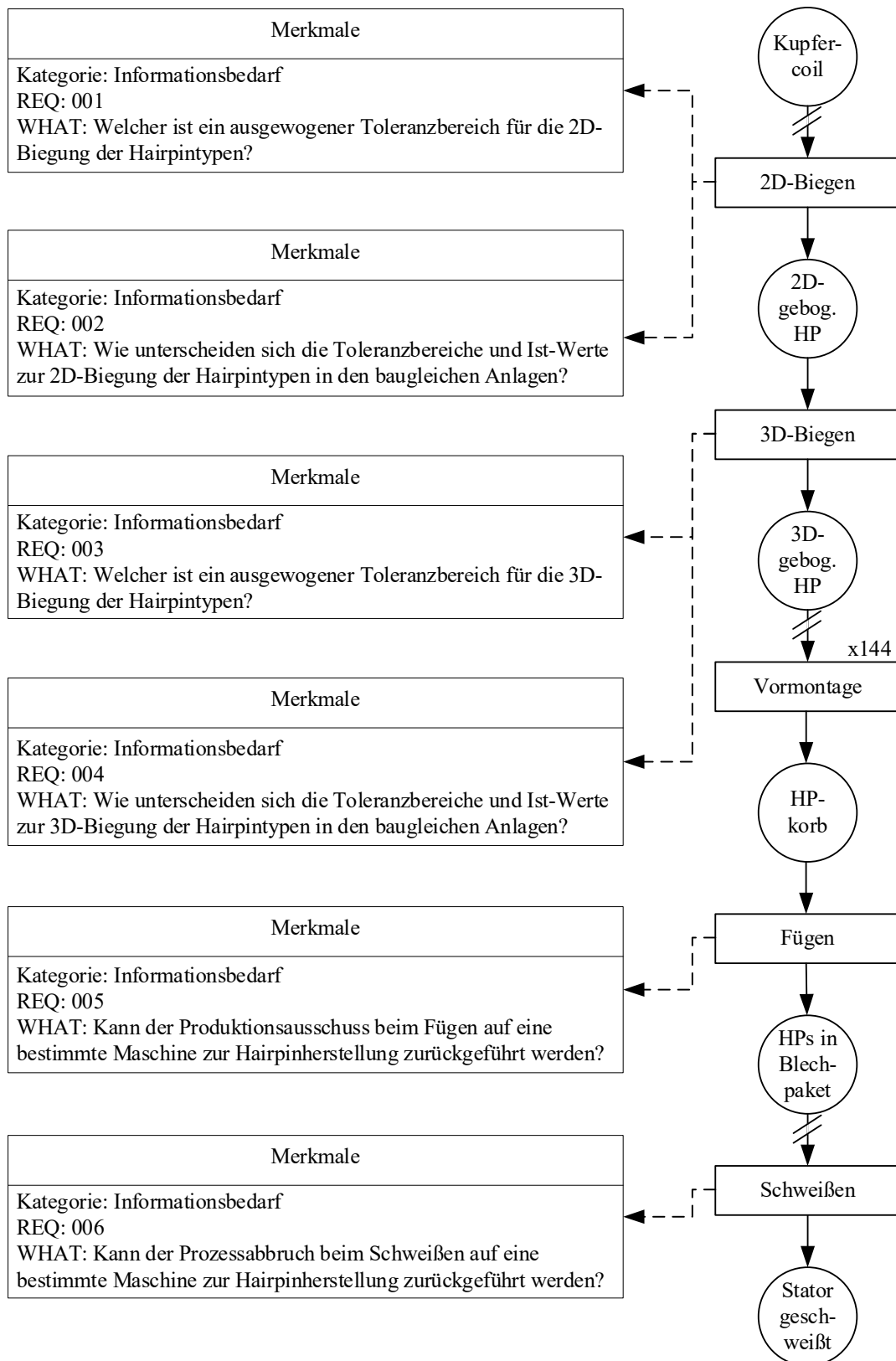


Abb. C-1: Modellierung des Informationsbedarfes bzgl. des Stator-Produktionssystems

Eigene Darstellung auf Basis von (vgl. VDI/VDE 3682 Blatt 1:2015-05)