



OTTO VON GUERICKE  
UNIVERSITÄT  
MAGDEBURG

MB

FAKULTÄT FÜR  
MASCHINENBAU

Otto-von-Guericke Universität Magdeburg

Fakultät für Maschinenbau

Institut für Arbeitswissenschaften, Fabrikautomatisierung und Fabrikbetrieb

Ableitung einer ganzheitlichen Transformationsstrategie zur Realisierung von  
Datendurchgängigkeit im Anlagenentstehungsprozess

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieurin

(Dr.-Ing.)

von M.Sc. Carmen Listl

geb. am 11.05.1993 in Landshut

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau

der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

- Erstgutachter: Prof. Dr.- Ing. habil. Arndt Lüder, Fakultät Maschinenbau, IAF, Lehrgebiet Fabrikautomation
- Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Tina Haase, Fraunhofer IFF & Fakultät für Humanwissenschaften, Bereich Berufspädagogik

Promotionskolloquium am 29.05.2024



## Abstract

The market requirements for a shorter product life cycle, a greater variety of products, a shorter time-to-market and new international competitors have made it clear to the automotive industry in particular that production systems must be flexible, optimizable and changeable. In the context of the fourth industrial revolution, the change towards these modern production systems is supported by the Industry 4.0 initiative and, from a (plant) engineering perspective, is fueled by the evolution of the digital twin technology.

Many technologies that can be regarded as technical enablers have been developed in order to be able to create virtual images and digital twins during the engineering phase of production systems. The fact that digital twins can already be created efficiently in the engineering process is often overlooked, even though the resulting potential is enormous. However, these technical means are not yet widely used in engineering processes in industry, as manufacturers are often skeptical about radical changes, the required know-how regarding the engineering of digital twins is lacking and there is no holistic transformation strategy towards consistent digital engineering. Although migration and process optimization strategies as well as strategies for digital transformation already exist in the literature, there is still a lack of approaches that deal with holistic transformation, consisting of technical, procedural and organizational optimizations.

The present thesis therefore presents a holistic approach in the form of a framework to support automotive manufacturers in particular in transforming their engineering processes. The aim of the transformation strategy is to identify all aspects that either have an influence on the transformation or are affected by the transformation. The identified aspects can then be systematically optimized using procedures described in detail and dedicated tools. The interdependence between technical, procedural and organizational measures plays an important role and is always taken into account.

The first part of the thesis defines the relevant theoretical principles in the context of Industry 4.0, digital technologies and basic engineering processes. In addition, the influence of recent technical innovations on manufacturers is examined. In addition, existing (technical) migration strategies, strategies for procedural optimization and

organizational change processes are analyzed, evaluated and compared in the literature.

The second part of the work includes a description of the engineering process currently in use and the definition of the process objective. The holistic transformation strategy can finally be derived from the findings of the comparison of actual and target process. This transformation strategy is described in the form of a framework. The logic of the approach and its embedded methods and tools are described in detail and finally applied using a real example. The results of this application presented at the end of the work clearly demonstrate the benefits of the defined transformation strategy. Nevertheless, some identified open issues are presented at the end, which may represent important approaches for future research.

## Kurzfassung

Die Marktanforderungen nach einem kürzeren Produktlebenszyklus, einer größeren Produktvielfalt, einer kürzeren Time-to-Market sowie neue internationale Wettbewerber haben insbesondere die Automobilindustrie erkennen lassen, dass Produktionssysteme flexibel, optimierbar und wandelbar sein müssen. Der Wandel hin zu diesen modernen Produktionssystemen wird im Kontext der vierten industriellen Revolution durch die Initiative Industrie 4.0 unterstützt und aus (Anlagen-) Engineering-Sicht durch die Evolution der digitalen Zwillinge befeuert.

Viele Technologien, die als technische Befähiger betrachtet werden können, wurden entwickelt, um bereits während der Engineeringphase von Produktionssystemen virtuelle Abbilder und digitale Zwillinge realisieren zu können. Der Aspekt, dass digitale Zwillinge bereits effizient im Engineeringprozess entstehen können, wird oft übersehen, obwohl die resultierenden Potenziale enorm sind. Diese technischen Mittel werden jedoch noch nicht flächendeckend in den Engineeringprozessen in der Industrie angewendet, da die Hersteller oft skeptisch gegenüber radikalen Veränderungen sind, das benötigte Know-how bezüglich des Engineerings von digitalen Zwillingen fehlt und eine ganzheitliche Transformationsstrategie in Richtung durchgängigen digitalen Engineerings fehlte. Obwohl Migrations- und Prozessoptimierungsstrategien sowie Strategien zur digitalen Transformation bereits in der Literatur existieren, fehlen noch Ansätze, die sich mit einer ganzheitlichen Transformation, bestehend aus technischen, prozessualen und organisatorischen Optimierungen, befassen.

Die vorliegende Arbeit stellt daher einen ganzheitlichen Ansatz in Form eines Rahmenwerks vor, um insbesondere Automobilhersteller bei der Transformation ihrer Engineeringprozesse zu unterstützen. Ziel der Transformationsstrategie ist es, alle Aspekte zu identifizieren, die entweder einen Einfluss auf die Transformation haben oder von der Transformation betroffen sind. Die identifizierten Aspekte können dann systematisch unter Anwendung von detailliert beschriebenen Vorgehensweisen sowie dedizierten Werkzeugen optimiert werden. Dabei spielt die Abhängigkeit zwischen technischen, prozessualen und organisatorischen Maßnahmen eine wichtige Rolle und wird stets berücksichtigt.

Im ersten Teil der Arbeit erfolgt eine Definition der relevanten theoretischen Grundlagen im Kontext Industrie 4.0, digitaler Technologien sowie grundlegender Engineeringprozesse. Zudem wird der Einfluss der technischen Innovationen auf Hersteller untersucht. Darüber hinaus werden bestehende (technische) Migrationsstrategien, Strategien zur prozessualen Optimierung sowie organisatorische Change Maßnahmen in der Literatur analysiert, bewertet und verglichen.

Der zweite Teil der Arbeit beinhaltet eine Beschreibung des aktuell gelebten Engineeringprozesses sowie die Definition des Prozesszielbilds. Aus den Erkenntnissen der Gegenüberstellung von Ist und Soll kann schließlich die ganzheitliche Transformationsstrategie abgeleitet werden. Diese Transformationsstrategie wird in Form eines Rahmenwerks beschrieben. Die Logik des Ansatzes sowie seine eingebetteten Methoden und Werkzeuge werden detailliert beschrieben und schließlich an einem realen Beispiel angewendet. Die am Ende der Arbeit vorgestellten Ergebnisse dieser Anwendung belegen den Nutzen der definierten Transformationsstrategie eindeutig. Dennoch werden abschließend einige identifizierte offene Punkte vorgestellt, die wichtige Ansätze für zukünftige Forschung darstellen können.

## Inhalt

Abstract .....	i
Kurzfassung .....	ii
Abbildungsverzeichnis .....	viii
Tabellenverzeichnis .....	xi
Abkürzungsverzeichnis .....	ii
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Einführung in die Thematik.....	1
1.2 Zielsetzung und Methodik.....	3
1.3 Aufbau der Arbeit .....	4
<b>2 Aktuelle Entwicklungen im Bereich moderner Produktions-systeme .....</b>	<b>7</b>
2.1 Historische Entwicklung moderner Produktionssysteme .....	7
2.2 Industrie 4.0 und Digitaler Zwilling .....	9
2.2.1 Status quo und Umsetzungsgrad Industrie 4.0 und Digitaler Zwilling..	18
2.2.2 Relevante Standards und Richtlinien im Bereich Industrie 4.0 und digitaler Zwilling.....	19
2.3 Einfluss der Entwicklungen auf moderne Produktionssysteme .....	24
2.3.1 Einfluss auf Dimension Technik .....	25
2.3.2 Einfluss auf Dimension Prozesse.....	26
2.3.3 Einfluss auf Dimension Organisation .....	28
2.3.4 Ableitung der notwendigen Charakteristika von Transformationen .....	29
2.4 Fazit .....	32

<b>3</b>	<b>Transformation, Migration, Prozessverbesserung und Change</b> .....	<b>34</b>
3.1	Migrationsprozesse und –strategien .....	34
3.1.1	Migrationsprozesse .....	35
3.1.2	Migrationsstrategien.....	46
3.2	Strategien zur Prozessoptimierung .....	49
3.2.1	KVP .....	49
3.2.2	Kaizen .....	51
3.2.3	Six Sigma .....	54
3.2.4	Business Reengineering .....	57
3.2.5	Agile Methoden .....	58
3.3	Organisatorische Change Prozesse .....	60
3.3.1	Lewin .....	61
3.3.2	Prosci ADKAR Model .....	62
3.3.3	Modell nach Kotter .....	64
3.3.4	Lippitt’s Phases of Change Theory .....	66
3.3.5	Prochaska and DiClemente’s Change Theory .....	68
3.3.6	Social Cognitive Theory .....	70
3.4	Transformationsstrategien.....	71
3.4.1	Six Keys to success.....	72
3.4.2	Digitalization Piano .....	73
3.4.3	Digital Reinvention Framework .....	74
3.4.4	The Digital Innovation Strategy.....	74
3.4.5	Digital Transformation Framework.....	75
3.4.6	Digital Orchestra Framework .....	76



3.4.7	Digital Enterprise Integrative Management Framework.....	77
3.5	Bewertung und Vergleich .....	78
<b>4</b>	<b>Grundlagen Engineering Prozesse mit Fokus auf den Anlagenentstehungsprozess .....</b>	<b>83</b>
4.1	Darstellung Engineering Prozesse im Allgemeinen .....	84
4.1.1	Planung Fabriklayout .....	93
4.1.2	Gebäudeplanung .....	95
4.1.3	Mechanische Konstruktion.....	96
4.1.4	Elektrische Konstruktion.....	97
4.1.5	Softwareprogrammierung .....	97
4.2	Erläuterung des generischen Anlagenentstehungsprozesses .....	99
4.3	Durchgängiges und digitales Engineering .....	101
4.4	Engineeringdatenlogistik .....	104
4.5	Vorgehen zur Bewertung von Engineering Prozessen .....	108
4.5.1	VDI 3695 Zielzustandsmodell .....	110
4.6	Zusammenfassung.....	115
<b>5</b>	<b>Definition der Forschungslücke und Ableitung der Forschungsfragen .....</b>	<b>117</b>
<b>6</b>	<b>Beschreibung des IST-Prozesses in der Automobilindustrie.....</b>	<b>119</b>
6.1	Durchführung und Ergebnisbetrachtung der Experteninterviews .....	119
6.1.1	Beschreibung der Interviewdurchführung.....	119
6.1.2	Ergebnisübersicht.....	120
6.2	Workflowmodellierung und Beschreibung der Toolketten des definierten IST-Anlagenentstehungsprozesses .....	123
6.3	Aktuelle Datenlandschaft .....	126

6.4	Ableitung von Optimierungspotentialen .....	129
<b>7</b>	<b>Herleitung und Beschreibung des optimierten Anlagenentstehungsprozesses.....</b>	<b>133</b>
7.1	Herleitung des optimierten Anlagenentstehungsprozesses auf Basis der Ergebnisse der Experteninterviews.....	133
7.2	Zugrundeliegendes Meta-Datenmodell des durchgängigen Engineerings ..	143
7.3	Workflowmodellierung und Beschreibung der Toolketten des definierten SOLL-Anlagenentstehungsprozesses .....	146
7.4	Abweichungsübersicht zwischen IST- und SOLL-Prozess .....	156
<b>8</b>	<b>Ableitung, Definition und Detaillierung einer ganzheitlichen Transformationsstrategie .....</b>	<b>159</b>
8.1	Ganzheitliche Transformationsstrategie .....	159
8.2	Technische Migration zum SOLL-Prozess anhand „PERFoRM+“ .....	164
	8.2.1 Beschreibung der Vorgehensweise „PERFoRM+“ .....	166
	8.2.2 Methoden und Werkzeuge für die Anwendung von “PERFoRM+“.....	172
8.3	Prozessuale Optimierung des Anlagenentstehungsprozesses anhand der Kaizen Methode .....	179
	8.3.1 Beschreibung der Vorgehensweise mit Kaizen .....	179
	8.3.2 Methoden und Werkzeuge für die Anwendung von Kaizen .....	184
8.4	Organisatorischer Change durch die sozial kognitive Theorie.....	186
	8.4.1 Beschreibung der Vorgehensweise mit der sozial kognitiven Theorie	187
	8.4.2 Methoden und Werkzeuge für die Umsetzung organisatorischen Wandels.....	189
8.5	Zusammenfassung der ganzheitlichen Transformationsstrategie .....	195
<b>9</b>	<b>Anwendung des definierten Ansatzes am Beispiel des Anlagenentstehungsprozesses bei einem Automobilhersteller.....</b>	<b>197</b>

9.1	Technische Migration mit PERFoRM+ .....	197
9.1.1	Phase „Vorbereitung“ .....	197
9.1.2	Phase „Untersuchung der Optionen“ .....	202
9.1.3	Phase „Design“ .....	206
9.1.4	Phase „Implementierung“ .....	207
9.2	Prozessuale Optimierung .....	208
9.3	Organisatorischer Change.....	213
9.4	Bewertung der Anwendung .....	219
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>223</b>
<b>11</b>	<b>References .....</b>	<b>229</b>
<b>12</b>	<b>Anhang A – Gelebter Anlagenentstehungsprozess .....</b>	<b>255</b>
<b>13</b>	<b>Anhang B – SIPOC Analyse Soll–Anlagenentstehungsprozess .....</b>	<b>256</b>
<b>14</b>	<b>Anhang C – Fragebogen.....</b>	<b>260</b>
<b>15</b>	<b>Anhang D – Ergebnis Bebauungsuntersuchung .....</b>	<b>284</b>
<b>16</b>	<b>Anhang E – Zielbild Engineeringprozess .....</b>	<b>286</b>
<b>17</b>	<b>Anhang F – Ergebnisse Interviews durch Fragebogen.....</b>	<b>287</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit.....	6
Abbildung 2: Historische Entwicklung der industriellen Revolutionen [16].....	9
Abbildung 3: Normung (vollkonsensbasierte Standardisierung) [61] .....	20
Abbildung 4: RAMI 4.0 Modell [62] .....	21
Abbildung 5: Industrie 4.0 Komponente und ihre Einordnung über die entsprechenden RAMI-Schichten hinweg [31, 67].....	24
Abbildung 6: Einfluss auf die Dimensionen Technik, Prozess und Organisation .....	25
Abbildung 7: Ganzheitliche Transformation.....	30
Abbildung 8: Migration nach Mashup [90] .....	36
Abbildung 9: Migration nach SOAMIG [92] .....	37
Abbildung 10: Migration nach SMART [93].....	37
Abbildung 11: Migration nach Cloudstep [94].....	39
Abbildung 12: Migration nach Five-phased-waterfall-model [95] .....	40
Abbildung 13: Migration nach IMC-AESOP [96, 97] .....	41
Abbildung 14: Migration nach XIRUP [98] .....	42
Abbildung 15: Migration nach PERFoRM [99] .....	44
Abbildung 16: Migration nach FAR-EDGE [101].....	46
Abbildung 17: Big Bang Strategie [25].....	47
Abbildung 18: Parallel Systems Strategie [25] .....	48
Abbildung 19: Phased Introduction Strategie [25] .....	49
Abbildung 20: Deming-Kreis oder PDCA-Zyklus [86].....	50

Abbildung 21: Bedeutung der 3Ms [106].....	52
Abbildung 22: 7 Arten der Verschwendung [107] .....	52
Abbildung 23: Module von Six Sigma [111].....	55
Abbildung 24: Improvement Kata [119] .....	60
Abbildung 25: Phasen der Lippit's Theorie [127].....	68
Abbildung 26: Prochaska and DiClemente's Change Theory [129] .....	70
Abbildung 27: Digital Orchestra Framework [142] .....	77
Abbildung 28: Einordnung der Fabrikplanung in die Unternehmensplanung [147].	85
Abbildung 29: Phasenmodell für Planung und Realisierung verfahrenstechnischer Anlagen [148].....	88
Abbildung 30: Detailed Engineering und Simulation im V-Modell [149] .....	91
Abbildung 31: Engineeringprozess von Produktionsanlagen (vereinfacht) .....	92
Abbildung 32: Gestaltungsprinzipien Layoutplanung [150].....	93
Abbildung 33: Aggregation Engineeringprozesse nach [162].....	101
Abbildung 34: Direkte Datenaustauschstruktur [176] .....	105
Abbildung 35: Indirekte Datenaustauschstruktur [176].....	105
Abbildung 36: Vorgehensweise zur Anwendung der VDI-Richtlinie 3695 [10].....	110
Abbildung 37: Gewerkeübergreifende Anlagenarchitektur [195] .....	112
Abbildung 38: Anzahl der Nennungen von Verschwendungsquellen im Prozess...	121
Abbildung 39: Absolute Gewichtung der Verschwendungsquellen .....	121
Abbildung 40: Absolute Bewertung Zielekategorien .....	122
Abbildung 41: Relation zwischen Optimierungspotenzialen und Maßnahmen .....	142

Abbildung 42: Metadatenmodell [205].....	145
Abbildung 43: Soll-Modell Anlagenentstehungsprozess .....	153
Abbildung 44: Toolkette im Soll-Prozess.....	155
Abbildung 45: ganzheitliche Transformationsstrategie .....	160
Abbildung 46: Definition des Migrationspfads nach PERFoRM [99].....	166
Abbildung 47: Migrationsmatrix .....	175
Abbildung 48: Migrationsmatrix durchgängiges digitales Engineering .....	176
Abbildung 49: Bebauungsuntersuchung Vorgehen.....	177
Abbildung 50: Bebauungsuntersuchung – Interviewdurchführung.....	178
Abbildung 51: Maßnahmen aus VDI 4499 [165].....	190
Abbildung 52: Schulungskonzept .....	194
Abbildung 53: Ergebnis Befragung für Phase 1 des PERFoRM+ Ansatzes.....	198
Abbildung 54: Migration Matrix am Beispiel .....	204
Abbildung 55: Vereinfachte Darstellung der Ergebnisse der Bebauungsuntersuchung .....	207
Abbildung 56: Prozessverbesserung nach Umsetzung der Datendrehscheibe.....	213
Abbildung 57: Lernpfad Data Steward am betrachteten Beispiel.....	217
Abbildung 58: ganzheitliche Transformationsstrategie .....	226
Abbildung 59: Gelebter Anlagenentstehungsprozess [200, 201].....	255
Abbildung 60: Ergebnis Bebauungsuntersuchung (verallgemeinert) .....	284
Abbildung 61: Zielbild Engineeringprozess inkl. Prozessschrittkürzel .....	286

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bewertung und Vergleich der Ansätze zur Transformation.....	79
Tabelle 2: Mapping der Merkmale durchgängigen Engineerings [172] mit den Zielzuständen aus [10] .....	111
Tabelle 3: Merkmale durchgängigen digitalen Engineerings, Zielzustände nach VDI 3695 und Zielsätze.....	123
Tabelle 4: Optimierungspotenziale des Anlagenentstehungsprozesses in der Automobilindustrie.....	132
Tabelle 5: Maßnahmen zur Realisierung der Umsetzungspfade.....	141
Tabelle 6: AML-Modellierungswerkzeuge .....	144
Tabelle 7: Detaillierung Metadatenmodell.....	146
Tabelle 8: Stärken der Ausgangssituation .....	198
Tabelle 9: Schwächen der Ausgangssituation.....	199
Tabelle 10: Bewertung und Vergleich der Optionen im realen Beispiel.....	205
Tabelle 11: Bewertung der Anwendung der ganzheitlichen Transformationsstruktur anhand VDI 3695 Zielzustandsmodell.....	220

## Abkürzungsverzeichnis

AAS – Asset Administration Shell

AEP – Anlagenentstehungsprozess

AML – Automation Markup Language

AR – Artificial Intelligence

CEN – Comité Européen de Normalisation

CENELEC – Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung)

CPPS – Cyberphisches Produktionssystem

CPS – Cyberphisches System

DIN– Deutsches Institut für Normung

DKE – Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

DL – Deep Learning

DM – Digitales Modell

DS – Digitaler Schatten

DT – Digital Thread

ESO – European Standardisation Organisation

ETSI – European Telecommunications Standards Institute

GU – Großunternehmen

IEC – International Electrotechnical Commission

ISO – International Organization for Standardization

IT – Informationstechnologie

ITU – International Telecommunication Union

KI – Künstliche Intelligenz

KMU – Kleine und mittlere Unternehmen

KVP – Kontinuierlicher Verbesserungsprozess

ML –

MQTT – Message Queuing Telemetry Transport

NASA – National Aeronautics and Space Administration

OPC-UA – Open Platform Communications Unified Architecture

PEP – Produktentstehungsprozess

PPR – Produkt Prozess Ressource

RAMI 4.0 – Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0

SCI 4.0 – Standardization Council Industrie 4.0

SDLC – Software Development Lifecycle

SOA – serviceoriented architecture

SPS – Speicherprogrammierbare Steuerung

STEP – Standard for the Exchange of Product Data

TGA – Technische Gebäudeausrüstung

TRL – Technology Readiness Level

VDE – Verband der Elektrotechnik Elektronik und Informationstechnik e.V

VDI – Verein Deutscher Ingenieure

VR – Virtual Reality





# 1 Einleitung

## 1.1 Einführung in die Thematik

Aktuelle Entwicklungen rund um Energieknappheit und den Klimawandel zeigen, dass die Anforderungen an die Automobilbranche stetig komplexer werden. Was heute in der Industrie als innovativ gilt, entspricht bald schon einer überholten Technologie. Vor allem die Ressourcen Energie, Arbeitskraft und Rohstoffe müssen effizienter genutzt und langfristig noch viel effektiver eingesetzt werden. Gleichzeitig setzen die Verbraucher voraus, dass ihnen Produkte immer schneller geliefert und in immer kürzeren Abständen Innovationen geboten werden. Die Variantenvielfalt und die Heterogenität an geforderter Funktionalität lassen die Komplexität der Produkte dabei unaufhörlich weiter ansteigen. Schließlich wird von den zunehmend kurzlebigen, komplexen Produkten – einschließlich der Produktionsanlagen – erwartet, dass diese sich höchst flexibel nutzen und einsetzen lassen [1].

Diese wachsenden Anforderungen führen zu dem Bedarf nach immer kürzer werdenden Entwicklungszyklen im Anlagenbereich, um die stetig weiterentwickelten Produkte schneller auf den Markt bringen zu können und so wettbewerbsfähig zu bleiben. Diese enormen Umbrüche, die besonders die Automobilindustrie derzeit erlebt, sollen nicht nur bewältigt werden, sondern die Branche als Ganzes bestärkt aus dem Strukturwandel herausgehen. Dazu haben sich auf Basis der fortschreitenden Digitalisierung und der verfügbaren Technologien im Bereich Industrie 4.0 einige Schlüsselkompetenzen herauskristallisiert, wie etwa die Implementierung digitaler Zwillinge [2]. Dabei fungiert das virtuelle Abbild der realen Produktion als digitaler Zwilling in Form eines Datenbündels, das in Echtzeit erzeugt und laufend aktualisiert wird. Er begleitet sein reales Vorbild über dessen gesamten Lebenszyklus und kann entscheidend zu einer ressourceneffizienten und damit ökologisch und ökonomisch nachhaltigen Produktion beitragen [3]. Ferner bildet diese Datenbasis das Fundament für weitere Digitalisierungsthemen in der Fahrzeugproduktion [4]. Mithilfe der digitalen Zwillinge können Entwickler komplexe Situationen berechnen, Funktionen verändern sowie neue Einstellungen testen – und das deutlich schneller und kostengünstiger als mit herkömmlichen Verfahren. Als Datenschaltstelle zwischen

Herstellern, Zulieferern und Kunden bildet der digitale Zwilling einen beständigen Datenfluss, der die fortlaufende Optimierung des physischen Produktes ermöglicht und Daten aus unterschiedlichsten Bereichen auf einer Plattform zusammenführt. So wird mit Abteilungs- und Unternehmensgrenzen gebrochen und eine neue Transparenz über alle an der Wertschöpfungskette angeschlossenen Prozesse ermöglicht.

In der Literatur lassen sich jedoch einige Herausforderungen bei der Implementierung von digitalen Zwillingen finden. So beschreibt Meißner et al. als größtes Hindernis die fehlenden Standards, den Mangel an Fachkräften und vor allem Know-How sowie den niedrigen Reifegrad der Technologien [5]. Des Weiteren fehlt es an durchgängiger Planung und branchenübergreifenden, standardisierten Kommunikationsprotokollen für Datenschnittstellen sowie an anpassungsfähigen und flexiblen Unternehmenskulturen [6, 7]. Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass die Zusammenarbeit entlang ganzer Wertschöpfungsketten Offenheit, unternehmensübergreifende Kooperationsbereitschaft, Vertrauen und kompatible Technologien sowie die Qualifizierung der Mitarbeiter für Prozessplanungs- und Koordinationsaufgaben erfordert. Diese Aspekte lassen sich in Anlehnung an [8] anhand der folgenden drei Dimensionen zusammenfassen: Technik, Prozesse und Organisation. In jeder dieser drei Dimensionen sind gravierende Transformationen nötig, um die Industrie zukunftssicher weiterzuentwickeln. In der vorliegenden Arbeit werden diese Transformationen im Zusammenhang mit dem Anlagenentstehungsprozess betrachtet. Das durchgängige Engineering im Anlagenentstehungsprozess ist als eines der drei Charakteristika von Industrie 4.0 essenziell für die Umsetzung des Zukunftsprojekts. Nur mit einem durchgängigen Informationsfluss zwischen wertschöpfenden Prozessen kann dieses Zielbild umgesetzt werden [9].

Diese Problemstellung wurde vom VDI aufgegriffen und in der Richtlinie 3695 [10] durch die Definition von Qualitätslevels für die Optimierung des Engineerings als Handlungsempfehlung für die Industrie herausgegeben. Die Zielzustände der jeweiligen Qualitätslevels beziehen sich auf die Themenfelder Prozesse, Methoden, Hilfsmittel und Aufbauorganisation und decken damit auch aktuelle Aspekte der

Digitalisierung von Engineeringprozessen ab [10]. Die Erreichung der definierten Zielzustände wird Auswirkungen auf die oben genannten Dimensionen Technik, Prozesse und Organisation haben. Um diese dreidimensionale Transformation hin zu den Zielzuständen aus der VDI Richtlinie 3695 so effektiv und effizient wie möglich zu gestalten, ist eine geeignete ganzheitliche Transformationsstrategie notwendig.

## 1.2 Zielsetzung und Methodik

Ziel der Arbeit ist die Definition einer ganzheitlichen Transformationsstrategie hin zu einem „neuen“ Anlagenentstehungsprozess, der befähigt ist durch durchgängiges digitales Engineering. Der Anlagenentstehungsprozess betrachtet das Engineering sowie das Design von Produktionssystemen in der Automobilbranche aus der Sicht eines OEMs. Daher ist an dieser Stelle festzuhalten, dass in der vorliegenden Arbeit ein Produktionssystem als Klammer für alle wertschöpfenden Tätigkeiten, Prozesse und Anlagen zur Herstellung eines Produkts verstanden wird. Darüber hinaus bezeichnet ein Produkt in der vorliegenden Arbeit stets ein Endprodukt, wie bspw. ein Auto.

Um die Ableitung der Transformationsstrategie zu ermöglichen, wird der momentan gelebte Anlagenentstehungsprozess mit dem abgeleiteten „neuen“ Anlagenentstehungsprozess verglichen. Dabei werden die Anforderungen an die beteiligten Engineering-Disziplinen definiert sowie notwendige Maßnahmen zur Transformation aus technischer, prozessualer und organisatorischer Sicht definiert. Zur Validierung der Anforderungen und der entsprechenden Maßnahmen werden Experteninterviews durchgeführt.

Die abgeleitete und validierte Strategie sowie die Darstellung des „neuen“ Anlagenentstehungsprozesse inklusive der Nutzung einer beispielhaften Toolkette wird an einem Beispiel aus der Automobilindustrie verprobt.

Aus dieser Verprobung werden weitere Maßnahmen zur Optimierung der Strategie in der Zukunft abgeleitet.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Im ersten Kapitel wird das aktuelle industrielle Umfeld beschrieben, in welchem die vorliegende Arbeit platziert ist. Auf Basis dessen wird die Problemstellung erörtert, die ausschlaggebend für die Definition der Forschungsfragen ist. Anschließend wird die konkrete Zielsetzung der Arbeit sowie die angewandte Methodik zur Erreichung dieser beschrieben. Außerdem erfolgt ein kurzer Überblick über den Aufbau der vorliegenden Arbeit.

In Kapitel zwei wird nach einem Ausflug in die historische Entwicklung von Produktionssystemen ein Blick auf aktuelle Entwicklungen im Bereich moderner Produktionssysteme mit Fokus auf den Anlagenentstehungsprozess geworfen. Dabei werden speziell die Entwicklungen im Zusammenhang mit Industrie 4.0 und dem Einsatz digitaler Zwillinge sowie den Folgen dieser Technologien für den Anlagenentstehungsprozess mit besonderem Fokus auf die drei Dimensionen Technik, Prozesse und Organisation beleuchtet. Außerdem werden Charakteristika von Migrationen in früheren Entwicklungsstufen betrachtet.

Kapitel drei beinhaltet eine allgemeine Betrachtung von Migrations- und Transformationsprozessen sowie -strategien in der Literatur. Anschließend werden Migration und Transformation bei Engineering Workflows genauer betrachtet und abgeleitet, welche Besonderheiten im Vergleich zu anderen Bereichen vorliegen. Auf Basis dessen werden existierende Migrations- und Transformationsprozesse und deren Anwendung im Engineering erläutert.

Im darauffolgenden vierten Kapitel erfolgt die Schaffung von Grundlagen der Engineering Prozesse mit Fokus auf den Anlagenentstehungsprozess. Dazu werden zuerst Engineering Prozesse im Allgemeinen dargestellt und anschließend der Anlagenentstehungsprozess genauer betrachtet. Der Fokus liegt dabei auf der Beschreibung der theoretischen Bestandteile eines Engineeringprozesses für Produktionssysteme, wie sie in der Literatur beschrieben werden. Dieser wird im Folgenden als Workflow inkl. Toolketten modelliert. Zur Bewertung der Reife von Anlagenentstehungsprozessen existieren verschiedene Messkriterien, welche abschließend beleuchtet werden. Auf Basis der bisher dargestellten Sachverhalte wird

in Kapitel fünf die Forschungslücke definiert. Daraus abgeleitet werden anschließend die Forschungsfragen.

Kapitel 6 widmet sich der Beschreibung des IST–Anlagenentstehungsprozesses in der Automobilindustrie. Im Gegensatz zum vierten Kapitel wird hier der tatsächlich gelebte Prozess beschrieben. Zur Bewertung des Bedarfs nach einem „neuen“ Anlagenentstehungsprozess sowie den dafür notwendigen Maßnahmen werden Experteninterviews durchgeführt und deren Ergebnisse anschließend diskutiert. Auf Basis der Interviewergebnisse und der Literaturrecherche wird eine Workflowmodellierung inkl. Beschreibung der Toolketten des definierten IST–Anlagenentstehungsprozesses durchgeführt. Das Ergebnis dieses Kapitels ist die Ableitung von Optimierungspotentialen für zukünftige Entwicklungen des Anlagenentstehungsprozesses.

Die Ergebnisse des sechsten Kapitels werden nun in Kapitel sieben zur Herleitung und Beschreibung des SOLL–Prozesses genutzt. Dazu werden anschließend die Workflows modelliert und die veränderten Toolketten bzw. die Anforderungen an ebendiese beschrieben. Zusammenfassend wird eine Abweichungsübersicht zwischen IST– und SOLL–Prozess erstellt und davon die Technologieanforderungen zur Migration in Richtung SOLL–Prozess abgeleitet. Dabei wird nach den drei Dimensionen Technik, Prozesse und Organisation differenziert.

In Kapitel 8 erfolgt aufbauend auf den bisherigen Erkenntnissen, insbesondere der Bewertung bestehender Transformationsstrategien, die Ableitung, Definition und Detaillierung einer ganzheitlichen Transformationsstrategie bestehend aus einer technischen Migration, einer prozessualen Optimierung sowie einem organisatorischen Wandel. Dazu werden nicht nur die jeweiligen Vorgehensweisen beschrieben, sondern auch konkrete Werkzeuge vorgeschlagen und deren Einsatz erläutert.

Die definierte ganzheitliche Transformationsstrategie wird anschließend in Kapitel 9 an einem konkreten Beispiel bei einem Automobilhersteller verprobt. Anhand dieser Verprobung können schließlich weitere Optimierungspotenziale sowie Ansätze zur weiteren Forschung abgeleitet werden.

Abschließend werden die Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit in Kapitel 10 zusammengefasst, diskutiert und kritisch beleuchtet.

Abbildung 1 veranschaulicht den Aufbau der vorliegenden Arbeit grafisch.

Einführung		Motivation, Grundlagen
Aktuelle Entwicklungen im Bereich moderner Produktionssysteme mit Fokus auf den Anlagenentstehungsprozess	Migrationsprozesse in der Literatur Grundlagen Engineering Prozesse	
Definition der Forschungsfrage und Aufgliederung in Teil-Fragen		Forschungslücke
Beschreibung des IST-Prozesses inkl. Toolketten und Workflows		Hinführung zum Lösungskonzept
Beschreibung des SOLL-Prozesses inkl. Toolketten und Workflows und ggf. Adaptertechnologien (auch Definition der Randbedingungen)		
Ableitung, Definition und Detaillierung einer Migrationsstrategie unter Betrachtung prozessualer, technischer und menschlicher Aspekte		Entwicklung des Lösungskonzepts
Anwendung (POC) des definierten Ansatzes an einem Beispielprozess unter Verwendung eines AML-Datensatzes		Validierung des Lösungskonzepts
Zusammenfassung und Ausblick		Zusammenfassung

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit

## 2 Aktuelle Entwicklungen im Bereich moderner Produktionssysteme

In diesem Kapitel werden die Grundlagen zum Verständnis der Zusammenhänge in modernen Produktionssystemen beschrieben. Dazu werden historische Abläufe dargestellt, die zur Entwicklung von Industrie 4.0 und digitalen Zwillingen geführt haben. Darauf aufbauend erfolgt eine Beschreibung, was mit den Begriffen „Industrie 4.0“ und „digitale Zwillinge“ gemeint ist und wie der Status quo dieser Technologien aussieht. Außerdem werden Standards beleuchtet, die sich in diesem Zuge herauskristallisiert haben. Anschließend erfolgt eine Untersuchung, welchen Einfluss diese Technologien und Standards auf moderne Produktionssysteme haben, insbesondere in Hinblick auf die fokussierten Dimensionen Technik, Prozesse und Organisation. Zusammenfassend werden auf Basis dieser Erkenntnisse relevante Charakteristika für Transformationsstrategien zur Realisierung von Datendurchgängigkeit im Anlagenentstehungsprozesses abgeleitet.

### 2.1 Historische Entwicklung moderner Produktionssysteme

Betrachtet man die Produktionssysteme im Jahre 2022, so findet man an vielen Stellen Maschinen, Roboter und andere Akteure, die mit dem Internet verbunden sind, miteinander kommunizieren können und in Echtzeit Daten an verschiedene IT-Systeme senden. Durch diverse technologische Innovationen ergeben sich zahlreiche Möglichkeiten für produzierende Unternehmen, um ihre Wertschöpfungsprozesse effizienter zu gestalten. Doch all diese Entwicklungen sind zurückzuführen auf vorangegangene Errungenschaften der Technik sowie der kontinuierlichen Optimierung der Wertschöpfungsprozesse. In der Literatur werden bis zum heutigen Zeitpunkt vier sogenannte industrielle Revolutionen beschrieben. Die vier beschriebenen Stufen sind nicht scharf voneinander abgrenzbar und dennoch stellen sie jeweils eine Art Revolution in der Industrie dar. Die historischen Entwicklungen der Produktionssysteme lassen sich außerdem an den gesellschaftlichen Auswirkungen und der damit verbundenen Weiterentwicklung des Wohlstands erkennen [11]. Die industriellen Revolutionen lassen sich als eine Entwicklung der fortschreitenden Automatisierung bezeichnen. Die erste industrielle Revolution gegen



Ende des 18. Jahrhunderts wurde durch die Einführung mechanischer Produktionsanlagen mit Antrieb durch Wasser- oder Dampfkraft ermöglicht. Allgemein wird dieser Vorgang auch als "Industrialisierung" bezeichnet, da in dieser Zeit die ersten Maschinen durch die Kraft von Dampf und Wasser betrieben wurden statt durch menschliche Arbeitskraft, z. B. maschinelle Webstühle. Ein Jahrhundert später, im Zuge der zweiten industriellen Revolution, wurde die arbeitsteilige Massenproduktion mit elektrischen Antrieben eingeführt. Die Entwicklung von Elektrizität und Motoren führte zu einer zunehmenden Unabhängigkeit der Produktion von Wasser und Dampf für den Antrieb der Maschinen, wodurch eine deutliche Steigerung der Flexibilität folgte. Die anschließende Erfindung des Fließbandes in der Automobilproduktion durch Henry Ford führte zu Beginn des 20. Jahrhunderts zu einer weiteren deutlichen Steigerung der Effektivität in der Produktion. Durch die Reihenfertigung wurden Produkte in noch kürzerer Zeit und in noch größeren Mengen hergestellt (Massenfertigung). Der Beginn der dritten Revolution wird meist auf die Siebzigerjahre des zwanzigsten Jahrhunderts datiert [12-14]. Seit Elektronik-Komponenten für den Einsatz in industriellen Umgebungen zur Verfügung stehen, wird die Produktionsautomatisierung durch Elektronik, IT und Speicher programmierbare Steuerungen (SPS) vorangetrieben [13]. Maschinelle Abläufe und Regelungen konnten hoch effizient gesteuert werden und menschliche Eingriffe auf ein Minimum reduziert werden. Die Entwicklung der Elektronik ging rasant voran, so dass Steuerungen immer leistungsfähiger und kleiner wurden. Immer mehr Geräte konnten mit eigener Intelligenz ausgestattet werden. In dem Zuge waren auch immer mehr Daten verfügbar, die aus der Automatisierung aufgezeichnet werden konnten. In der Industrie 3.0 können Auswertungen auf diese Daten aber immer nur im Nachgang erfolgen und die Erkenntnisse nur langsam wieder in die Automatisierung zurückgegeben werden. Die vierte industrielle Revolution entwickelt sich jetzt, indem die intelligenten Automatisierungsgeräte und alle anderen an der Produktion beteiligten Systeme bestmöglich vernetzt werden. Durch die Vernetzung entstehen revolutionäre Möglichkeiten in der Abstimmung der Systeme untereinander. Jedes System kann jederzeit an die Informationen gelangen, die es für einen optimalen Betrieb benötigt und ebenfalls kann es seine eigenen Daten zur Verfügung stellen. Dadurch entsteht in der Industrie 4.0 für die Produktion die

Möglichkeit der Selbstoptimierung und Selbststeuerung und damit die intelligente Fabrik. Die Vernetzung ist nicht auf bestimmte Bereiche begrenzt und schließt auch die produzierte Ware selbst mit ein. Daten aus dem Lebenszyklus des Produktes fließen in die Entwicklung zurück und können direkten Einfluss auf die aktuelle Produktion nehmen. Maschinen können ihren Zustand mit anderen Produktionssystemen teilen, die wiederum darauf reagieren können. In der Industrie 4.0 ist auch der Kunde bestmöglich integriert, so dass Kundenwünsche optimal in die Produktion aufgenommen werden, bis hin zur Produktion mit der Losgröße 1 (siehe Ziele Industrie 4.0). [15]

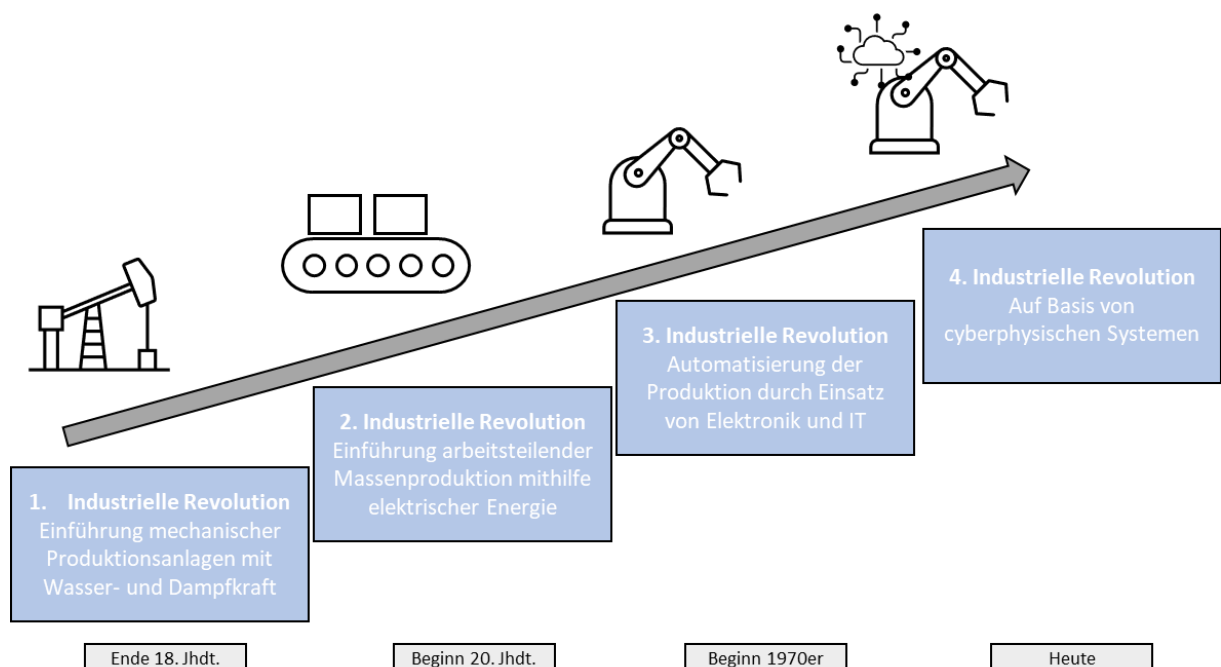


Abbildung 2: Historische Entwicklung der industriellen Revolutionen [16]

## 2.2 Industrie 4.0 und Digitaler Zwilling

### Industrie 4.0

Die dynamische Entwicklung der vierten industriellen Revolution wurde und wird nach wie vor angetrieben durch diverse Triebkräfte. Insbesondere die zunehmende Internationalisierung der Märkte sowie der Rückgang der Fertigungstiefe, verbunden

mit der sog. „Mass Customization“, erfordern eine rasche Umsetzung der innovativen Technologien, die im Rahmen von Industrie 4.0 befähigt werden. Der Trend in Richtung Dezentralisierung von Planungs- und Steuerungskonzepten ist zum einen Enabler vieler innovativer Projekte und zum anderen Treiber in Richtung Software- und Prozessanpassungen. [17]

All das, sowie die bereits erwähnten, sich stetig verkürzenden Produktlebenszyklen führten unter Anderem zu der Etablierung des Zukunftsprojekts „Industrie 4.0“ durch die Forschungsunion der deutschen Bundesregierung und einem gleichnamigen Projekt in der Hightech-Strategie der Bundesregierung. Ziel des Projekts ist es, „die deutsche Industrie in die Lage zu versetzen, für die Zukunft der Produktion gerüstet zu sein“ [3].

In der Literatur sind zahlreiche und vielfältige Definitionen des Begriffs zu finden, sie beschreiben im Kern aber eine ganzheitliche Digitalisierung und internetgestützte Vernetzung von Maschinen und Produkten und betrachten die digitale Transformation der gesamten Wertschöpfungskette im Unternehmen mit. Industrie 4.0 projiziert das Internet der Dinge, auch bekannt als Internet of Things (IoT) und das Internet der Dienste auf moderne Produktionssysteme. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die Reduzierung von Medienbrüchen zwischen der realen Fabrikwelt und des entsprechenden virtuellen, digitalen Modells. Auch die daraus resultierenden, sowie bereits bestehende Applikationen und Dienstleistungen sollen möglichst frei von Medienbrüchen sein. [18]

In der Literatur wird Industrie 4.0 definiert als "die Integration komplexer physischer Maschinen und Geräte mit vernetzten Sensoren und Software, die zur Vorhersage, Steuerung und Planung besserer wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Ergebnisse eingesetzt werden" [19] oder "eine neue Ebene der Organisation und des Managements der Wertschöpfungskette über den Lebenszyklus von Produkten" [20] oder "ein Sammelbegriff für Technologien und Konzepte der Wertschöpfungskettenorganisation" [21]. Die Kombination dieser drei Definitionen stellt das zugrundeliegende Verständnis von Industrie 4.0 für die vorliegende Arbeit dar.

Die drei wichtigsten Charakteristika für die zunehmende Digitalisierung der Produktionssysteme sind die horizontale Integration über die Wertschöpfungsnetzwerke, die digitale Durchgängigkeit des Engineerings und die vertikale Integration mit vernetzten Produktionssystemen. Intelligente Fabriken, die im Wesentlichen den Kern von Industrie 4.0 bilden, können nicht auf einer eigenständigen Basis funktionieren. Die horizontale Integration stellt die Vernetzung der verschiedenen Systeme für die Unterstützung bzw. Durchführung der Wertschöpfungsprozesse (beispielsweise Fertigung, Logistik, Vermarktung, Engineering, Service) sowohl innerhalb eines produzierenden Unternehmens als auch über Unternehmensgrenzen hinweg sicher und schafft so eine durchgängigen Lösung [22]. Die digitale Durchgängigkeit des Engineerings über die gesamte Wertschöpfungskette bezieht sich auf den gesamten Lebenszyklus des Produktionssystems, bzw. Elemente davon, sowie des Produkts von der Entstehung bis hin zur Ausmusterung. Dabei werden digitale Modelle erstellt, welche über den gesamten Wertschöpfungsprozess durchgehend erweitert, genutzt und über Schnittstellen hinweg ausgetauscht werden. Wesentliche Vorteile dieser digitalen Modelle sind die ihnen zugrunde liegenden Beschreibungsmodelle und die darauf aufbauenden Planungsmethoden, Berechnungen, Simulationen und Optimierungen.[22, 23]

Das Wesen der vertikalen Vernetzung ergibt sich aus dem Einsatz von cyber-physischen Produktionssystemen (CPPS) und virtuellen Modellen, mit denen Fabriken und Produktionsanlagen schnell und angemessen auf Variablen wie Nachfrage, Lagerbestände, Maschinendefekte und unvorhergesehene Verzögerungen reagieren können [23, 24]. Die Integration erleichtert den Aufbau und die Aufrechterhaltung von Netzwerken, die Mehrwert schaffen und erhöhen. Die horizontale Integration beschreibt in erster Linie die Integration zwischen Geschäftspartnern und Kunden oder die Integration neuer Geschäftsmodelle über Länder hinweg hin zu einem globalen Netzwerk. [22, 23]

In zahlreichen Studien werden moderne Technologien als die zentralen Enabler von Industrie 4.0 genannt. Zu diesen Technologien zählen: Internet of Things, Internet of Services, Internet of People, Internet of Data, Cloud Computing, Big Data Analytics,

Blockchain, Cybersecurity, Augmented Reality, Automation / Industrial Robots, Additive Manufacturing, Simulation und Modellierung, Cyber-physische Systeme und Semantische Technologien [17, 25, 26]. Die Design Prinzipien für Systeme im Industrie 4.0 Umfeld lauten: Interoperabilität, Virtualisierung, Dezentralisierung, Echtzeit-Fähigkeit, Service Orientierung und Modularität. [23]

Durch die zunehmende Umsetzung und Integration von Industrie 4.0 Anwendungsfällen in modernen Produktionssystemen ergeben sich zahlreiche Chancen und Potenziale für Unternehmen. Aktuelle Studien heben besonders die Sicherung und den Ausbau der Wettbewerbsfähigkeit hervor, da digitale Technologien für die meisten Unternehmen bereits heute oder innerhalb der nächsten fünf Jahre einen bedeutenden Wettbewerbsfaktor darstellen [5, 27]. Auch finanzielle Aspekte spielen für viele Unternehmen bei der Entscheidung für die Digitalisierung eine Rolle. Die Stellhebel für diese Kostenreduktion sind unter anderem die zunehmende Effizienz von Produktionsanlagen und des Ressourceneinsatzes sowie sich verkürzende Prozesse [27].

Um die beschriebenen Potenziale erreichen zu können, sind einige Herausforderungen und Handlungsfelder in der Literatur zu finden. Viele Autoren sind sich einig, dass Standardisierung der entscheidende Enabler von zunehmender Digitalisierung der Wertschöpfungsprozesse ist [28]. Unter dem Handlungsfeld „Standardisierung“ lassen sich sowohl standardisierte Schnittstellen als auch Normen und offene Standards für Referenzarchitekturen oder branchenübergreifende, international einheitliche Datenformate eingruppiieren [29]. Ein höherer Grad an Standardisierung trägt auch zur Beherrschung der durch den steigenden Grad an Vernetzung komplexer werdenden Systeme bei [30]. Dieser Herausforderung und im speziellen der Lösung dieser widmet sich auch die „Deutsche Normungsroadmap Industrie 4.0“ von DIN und DKE [31].

Aus organisatorischer Sicht sind für die Unternehmen der Mangel an Fachkräften und das an vielen Stellen nicht vorhandene Knowhow die größten Hürden. Die notwendigen aber nicht ausreichend umsetzbaren Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen für Mitarbeiter, sowie die teils fehlende Akzeptanz für

Technologien im digitalen Industriezeitalter spielen dabei die Hauptrollen [27, 32, 33]. Zudem wirken die Komplexität vorhandener Strukturen, etablierte Arbeitsorganisation und –gestaltung oft als Blockaden für die Implementierung von neuen Technologien [27, 28, 32].

Aus prozessualer Sicht ist die Fähigkeit des effizienten Ressourceneinsatzes eine große Hürde auf dem Weg in Richtung Industrie 4.0 und Digitalisierung [27]. Um einen durchgängigen Engineeringprozess zu realisieren, sind durchgängige Werkzeugketten, eine konsequente Standardisierung der gesamten Wertschöpfungskette, Prozessstandardisierungen sowie kompatible Schnittstellen und einheitliche Datenmodelle und –formate notwendig [28].

Neben der organisatorischen und der prozessualen Sicht, existieren auch technische Hürden. So stellen die Identifikation von auszutauschenden Daten sowie die Anbindung von Datenquellen und Interpretationssystemen eine große Herausforderung dar [34]. Insbesondere auch die schlechte Datenqualität aufgrund von Toolbrüchen, womit gemeint ist, dass es keine Möglichkeit gibt, Daten von einem Tool in ein Folgetool zu übertragen sowie manuelle Eingaben oder die falsche Aggregation von Daten stellt nach wie vor ein Problem dar [18]. Laut einer Studie sehen sich viele Unternehmen außerdem mit einem allgemein niedrigen Reifegrad der Technologien sowie fehlenden technischen Standards konfrontiert [27].

### **Digitaler Zwilling**

Durch die zunehmende Digitalisierung und die breitere Verfügbarkeit innovativer Technologien wurde die Erstellung, Verwendung und Optimierung sog. Digitaler Zwillinge (DT) möglich. Betrachtet man den von Gartner für 2019 erstellten "Hype Cycle", so stellt man fest, dass der Digitale Zwilling als "Innovationstrigger-Technologie" bezeichnet wird und zu den fünf Technologien zählt, von denen erwartet wird, dass sie in den nächsten 5–10 Jahren den größten Einfluss haben werden [35].

Die erste Erwähnung des Begriffs „digitaler Zwilling“ ist auf die NASA (National Agency of Space and Aeronautics of the U.S.A.) im Rahmen des Apollo–Programms der späten 1960er Jahre zurückzuführen, welche damit die identische Nachbildung eines

Raumfahrzeugs beschrieben. Erst im Jahr 2010 ergänzte die NASA das Attribut „digital“ – der Begriff „Digitaler Zwilling“ war geboren. [36, 37]

In der Literatur existieren zahlreiche Definitionen, welche sich teilweise deutlich hinsichtlich der Bedeutung und des Umfangs digitaler Zwillinge unterscheiden. Die wohl bekanntesten Definitionen stammen von Shafto et al. [36], Glaessgen und Stargel [38] und Grieves [39]. [36] definiert den digitalen Zwilling als eine integrierte multiphysikalische, multiskalige, probabilistische Simulation eines Systems, die das beste verfügbare physikalische Modell verwendet. Für Glaessgen und Stargel umfasst der Digital Twin ein „As-Built“-System und erstreckt sich über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts [38]. Grieves [39] definiert den digitalen Zwilling als eine Reihe virtueller Informationskonstrukte, die ein potenzielles oder tatsächliches physisches Produkt von der atomaren Mikroebene bis zur makrogeometrischen Ebene vollständig beschreiben. Im Grunde handelt es sich bei einem digitalen Zwilling also um eine virtuelle Repräsentation, eine Verkörperung eines Assets jeglicher Art, ob materiell oder immateriell. Bezogen auf moderne Produktionssysteme ist der digitale Zwilling ein Abbild dieses Systems, bestehend wiederum aus digitalen Abbildern der einzelnen Komponenten innerhalb des Systems, welche miteinander sowie mit übergeordneten Systemen Daten austauschen können. Der digitale Zwilling reichert sich dementsprechend mit Beginn der Engineering Phase des betreffenden Assets kontinuierlich mit Daten und Informationen an und entspricht stets dem Zustand des realen Objekts während des gesamten Lebenszyklus. [40-46]

Für die vorliegende Arbeit ist es besonders wichtig zu betonen, dass der digitale Zwilling bereits in der Engineering Phase einer Anlage entsteht und somit nicht zwingend bereits zu Beginn ein physikalisches Gegenstück besitzt. Demnach wandelt sich das rein virtuelle Abbild eines Greenfield-Elements im Laufe seines Lebenszyklus hin zu einem digitalen Zwilling, sobald ein reales Gegenstück existiert. In Anlehnung an [47] kann ein digitaler Zwilling als ein Satz virtueller Informationen, der eine potenzielle oder tatsächliche physische Produktion beschreibt, betrachtet werden. Dieses virtuelle Modell kann im Rahmen von Simulationen, Software-Tests, virtuellen Inbetriebnahmen oder anderen Szenarien eingesetzt werden, um als

Entscheidungsgrundlage zu dienen oder das zukünftige Verhalten der Anlage oder des Produktionssystems darzustellen.

Der digitale Zwilling muss einige spezifische Merkmale aufweisen, um als solcher zu gelten. Dazu zählen Skalierbarkeit (Fähigkeit zur Analyse von Informationen in verschiedenen Maßstäben), Interoperabilität (Fähigkeit zur Konvertierung, Anpassung und Herstellung von Äquivalenz zwischen Darstellungsmodellen), Erweiterbarkeit (Fähigkeit zur Integration von Modellen) und Genauigkeit (Fähigkeit zur Übereinstimmung mit dem physischen Modell) [48] sowie Selbst-Evolution (autonome Evolution entlang des Lebenszyklus) und Konvergenz zwischen physikalischer und virtueller Welt [49].

Anhand dieser Merkmale kann der Begriff „digitaler Zwilling“ von einem „digitalen Modell“ (DM) und einem „digitalen Schatten“ (DS) abgegrenzt werden. Häufig werden diese Begriffe in der Literatur synonym oder sogar irrtümlich verwendet, da keine exakten Definitionen zugrunde gelegt werden. Das Digitale Modell (DM) ist eine digitale Darstellung eines bestehenden physischen Objekts, in der es keinen automatischen Datenaustausch zwischen dem physischen und dem digitalen Objekt gibt, es handelt sich also um eine statische digitale Kopie eines physischen Objekts. Der digitale Schatten kann als DM mit automatisiertem Einweg-Datenfluss, der das DM mit dem Status des physischen Objekts synchronisiert, verstanden werden. Der digitale Zwilling hingegen ist ein DM, bei dem der Datenfluss zwischen einem vorhandenen physischen Objekt und einem digitalen Objekt in beide Richtungen vollständig integriert ist. Im Vergleich zu einem DS können die aus dem digitalen Modell gewonnenen Informationen zur Optimierungs-Analyse mit anschließenden Änderungen am physischen Objekt genutzt werden. [50, 51]

Die Begriffe Digitaler Zwilling, digitales Modell und digitaler Schatten werden in der vorliegenden Arbeit entsprechend den oben genannten Definitionen verwendet.

Die Technologien, die die Implementierung, Nutzung und Optimierung von Digitalen Zwillingen ermöglichen, sind Bestandteil vieler aktueller Beiträge. Cyberphysische Systeme (CPS) stellen eine entscheidende Gruppe von Technologien dar, gefolgt von Künstlicher Intelligenz (KI), maschinellem Lernen (ML) und Deep Learning (DL), Virtual



Reality (VR) und Augmented Reality (AR), Big Data und IoT-Technologien, Simulation und Sensoren, Cloud und Data Analytics [52, 53]. Außerdem sind standardisierte Kommunikationsprotokolle (z.B. OPC-UA, MQTT, etc.) ein Befähiger für den Austausch von Informationen zwischen Digitalen Zwillingen, IT-Systemen und deren realem Gegenstück [54].

Durch die Umsetzung von Digitalen Zwillingen in der Produktion ergeben sich vielfältige Potenziale. So kann laut [23] der gesamte Produktionsprozess verbessert werden, da durch das Vorliegen eines digitalen Abbilds des Produktionssystems anhand von Simulationen wichtige Informationen gewonnen werden können. Abgeleitet von diesen Informationen können dann Optimierungsmaßnahmen im Produktionsprozess implementiert werden. [48, 49]

In der aktuellen Literatur lassen sich zahlreiche Herausforderungen bei der Implementierung und Verwendung von digitalen Zwillingen finden. Diese können in vier Kategorien eingeteilt werden: Standardisierung, Prozesse, Technologie und Organisation. Diverse Autoren beschreiben die Notwendigkeit zur Schaffung einer standardisierten Architektur eines digitalen Zwillings von physischen Komponenten (Maschinen, Maschinenkomponenten) angelehnt an Spezifizierungen von branchenübergreifenden Organisationen (z.B. ZVEI, VDE/VDI) [37]. Laut [51] fehlt es in der Literatur an einheitlichen Modellen und einer generischen Architektur des Digitalen Zwillings. Außerdem besteht kein Konsens darüber, wie der Aufbau eines Digitalen Zwillingsystems stattfinden soll. Die Herausforderung bei der Entwicklung eines digitalen Zwillings betrifft die Modellierung solcher Systeme, da es keinen standardisierten Ansatz für die Modellierung gibt. Standardisierte Ansätze stellen den Informationsfluss zwischen den einzelnen Phasen der Entwicklung und Implementierung eines Digitalen Zwillings sicher [51]. Eine weitere Herausforderung, die sich aus der Notwendigkeit zur Standardisierung ergibt, besteht darin, sicherzustellen, dass Informationen in jede der Entwicklungs- und Funktionsphasen der Modellierung eines Digitalen Zwillings übertragen werden können. Dadurch wird die Kompatibilität mit anderen Bereichen im Unternehmen sichergestellt, wodurch eine erfolgreiche Nutzung des Digitalen Zwillings in der Zukunft ermöglicht wird [51, 55].

Aus prozessualer Sicht ist eine solide, systematische und standardisierte Digitalisierung von Informationen, sowie die Virtualisierung der Produktion inklusive der Prozessmodellierung in einer virtuellen Umgebung notwendig, um eine höhere Stufe der horizontalen Integration der gesamten Wertschöpfungskette zu erreichen [37]. Diese Form der Prozess-Digitalisierung führt dazu, dass Planer in Zukunft einen besseren Zugang zu aktuellen und automatisch aktualisierten Planungsinformationen haben, was laut einer Studie eine der größten Herausforderungen bei der Implementierung digitaler Zwillinge ist [4].

Als organisatorische Herausforderungen beschreiben [52], dass das Problem häufig darin liegt, dass Unternehmen eine stark partitionierte Architektur aufweisen, was den Zugang zum gesamten Wissen der verschiedenen Bereiche oder Abteilungen erschwert. Die Vereinheitlichung und der Austausch von Wissen innerhalb des Unternehmens stellt eine große Herausforderung dar und kann zu Schwierigkeiten bei der Schaffung eines Datenflusses führen, der für die Erstellung einer DT erforderlich ist. Laut [56] sind die Unternehmen in verschiedene Abteilungen unterteilt, wie z. B. Design, Konstruktion und Fertigung, wobei jede Abteilung ihre eigenen Informationen über die verschiedenen Systeme und deren Nutzung hat und dabei fast keinen Informationsaustausch zwischen den Abteilungen realisiert. Um einen DT effektiv und effizient nutzen zu können, ist der Zugang zu Informationen aus verschiedenen Strukturen eine wichtige Voraussetzung und stellt laut [52] nach wie vor eine große organisatorische Herausforderung dar. Das Konzept des Digitalen Zwillings erfordert eine einheitliche Sichtweise auf Informationen, die über Funktionsgrenzen hinweg genutzt werden. [56] kommen zu dem Schluss, dass die beschriebenen Probleme kulturelle Fragen sind, die viel schwieriger zu lösen sind als technische Fragen. Kulturelle Veränderungen sind sehr schwer umzusetzen, sind aber zwingend für die vollständige Übernahme und Nutzung dieser Technologie erforderlich.

Die technischen Herausforderungen lassen sich laut [56] leichter lösen, da viele Technologien sich bereits in der Entwicklung befinden und sich die Dynamik dieser technologischen Entwicklungen weiter beschleunigen wird. Ein Problem liegt nach Ansicht von [57] eher in der technischen Absicherung des Datenschutzes und der Eigentumsverhältnisse von Daten sowie der Klärung von Haftungsfragen bei

Abweichungen zwischen DT und realem Asset. Außerdem untersuchen [58] in ihrem Beitrag das Problem der Datenkonsistenz im Sinne von effizientem Datenaustausch zwischen den Fachbereichen sowie von gewerkeübergreifenden Konsistenzprüfungen von Engineeringdaten.

### 2.2.1 Status quo und Umsetzungsgrad Industrie 4.0 und Digitaler Zwilling

Um einen besseren Überblick über das Umfeld, in der sich diese Arbeit befindet, zu gewinnen, werden im Folgenden der Umsetzungsgrad sowie einige Anwendungsbeispiele von Industrie 4.0 und Digitalen Zwillingen beleuchtet. Im Allgemeinen zeigt sich laut einer Studie von [5] aus dem Jahre 2017, dass lediglich bei 24 Prozent der KMU bzw. 35 Prozent der GU Industrie 4.0 bereits fester Bestandteil der Unternehmensstrategie ist. Außerdem haben sich 49 Prozent der KMU und 30 Prozent der GU noch nicht mit dem Thema auseinandergesetzt oder nehmen lediglich eine Beobachterposition ein. Diese Ergebnisse zeigen, dass Industrie 4.0 zwar bereits eine wichtige Rolle spielt, aber noch nicht vollständig in der Industrie ausgerollt ist. In der Literatur sind einige Anwendungsbeispiele beschrieben, anhand derer der Nutzen bzw. die Herausforderungen, die mit der Implementierung verbunden sind, verdeutlicht werden. So beschreibt [18] mehrere Fallstudien, darunter einen Anwendungsfall Intralogistik in der Ausprägung eines intelligenten Werkstückträgers, einen Anwendungsfall Produktionsplanung und Eskalationsmanagement durch die Synchronisierung einer bislang papiergestützten operativen und einer IT-gestützten mittelfristigen Produktionsplanung sowie den Anwendungsfall Verteilte Anlagensteuerung in einer Smart Factory, die aus verteilten, miteinander kommunizierenden Steuerungsinstanzen besteht. [18]

Auch der Digitale Zwilling findet immer mehr Einzug in moderne Produktionssysteme, obgleich die Häufigkeit der beschriebenen Anwendungsfälle in der Literatur mit Vorsicht betrachtet werden muss, wie [54] anhand eines Literaturreviews feststellt. So wird der Großteil der Veröffentlichungen als Digitaler Schatten (35 Prozent) und Digitales Modell (28 Prozent) klassifiziert, obwohl die Mehrheit der Beiträge den Begriff Digitaler Zwilling verwendet, dennoch beschreiben nur 18 Prozent von ihnen tatsächlich einen Digitalen Zwilling mit bidirektionalem Datentransfer.[54]

Allgemein lässt sich sagen, dass der digitale Zwilling derzeit vor allem im Bereich der Luft- und Raumfahrt zur Vorhersage von Fehlern und in der Produktwartungs- und Instandhaltungsphase eingesetzt wird [49, 59]. Weitere Anwendungsfälle, wie bspw. der von [60] beschriebene digitale Zwilling im Karosseriebau eines Automobilherstellers, zeigen, dass auch Fertigungsprozesse im industriellen Umfeld von dieser Technologie profitieren. Es wird erwartet, dass sich die Technologie des Digitalen Zwillings parallel zur Etablierung relevanter Befähiger-Technologien weiterverbreiten wird, um langfristig in den Produktionsprozessen Zeit und Kosten einsparen zu können [35].

### 2.2.2 Relevante Standards und Richtlinien im Bereich Industrie 4.0 und digitaler Zwilling

Die Standardisierung wurde sowohl für die Implementierung von Industrie 4.0 als auch für die des digitalen Zwillings als größte Herausforderung beschrieben. Daher werden im Folgenden die für die vorliegende Arbeit relevanten Standards und Richtlinien kurz vorgestellt. Allgemein sind bei der Standardisierung drei Fälle zu unterscheiden:

1. vollkonsensbasierte Standardisierung, auch Normung genannt,
2. konsortiale Standardisierung (umgangssprachlich vereinfacht „Standardisierung“ genannt),
3. „De-Facto“-Standardisierung durch Marktführer. [17]

In Anlehnung an [61] ist die vollkonsensbasierte Standardisierung, also die Normung, in der analogen Wirtschaft weit verbreitet. Abbildung 3 zeigt die für die Normung zuständigen Organisationen, welche für den deutschen Raum die DIN und DKE sind, in Europa sind es die drei sogenannten ESOs (European Standardisation Organisation), also CEN, CENELEC und ETSI und auf internationaler Ebene sind es ISO und IEC und für Telekommunikation die ITU sowie W3C für die Definition von Web-Standards. Da die Normung in der digitalen Wirtschaft weniger verbreitet ist, bilden sich hier zu Standardisierungszwecken zahlreiche Konsortien (z.B., eCl@ss), welche weltweit gültige Standards unabhängig von den etablierten Normungsorganisationen formulieren [61]. Eine erfolgreiche Standardisierung im Kontext von Industrie 4.0

kann nur unter Einbindung aller relevanten Kreise und aller in diesem Umfeld agierenden Standardisierungsorganisationen – ob konsensbasierend oder konsortial – erfolgen. Aus diesem Grund wurde durch die Industrieverbände ZVEI, VDMA und bitkom zusammen mit DIN und DKE sowie der Plattform Industrie 4.0 zur Hannover Messe 2016 der „Standardization Council Industrie 4.0“ (SCI 4.0) gegründet. Dieser Council ist strategisch an die Plattform Industrie 4.0 angebunden und setzt die dort erarbeitete und abgestimmte Industriestrategie zur Standardisierung im Umfeld der „Industrie 4.0“ organisatorisch um.



Abbildung 3: Normung (vollkonsensbasierte Standardisierung) [62]

Im Folgenden werden die für den Betrachtungsumfang der vorliegenden Arbeit relevanten Standards näher beleuchtet.

## RAMI 4.0

Der wohl bekannteste Standard im Bereich Industrie 4.0 befasst sich mit dem Referenzarchitekturmodell (RAMI 4.0) und ist mittlerweile in nationalen sowie internationalen Standardisierungsgremien und Kooperationen als internationale IEC PAS 63088 erfolgreich eingebracht. RAMI 4.0 dient als Orientierungsrahmen für die Stakeholder und Klassifizierung von Anwendungen im industriellen Bereich. RAMI 4.0 führt alle Elemente und IT-Komponenten in einem Schichten- und Lebenszyklusmodell zusammen und bildet diese in überschaubaren Paketen ab – inkl.

Datenschutz und IT-Sicherheit (siehe Abbildung 4). Industrie 4.0 spezifiziert mit RAMI 4.0 nicht eine allgemein gültige und anzuwendende Architektur, sondern lediglich den Rahmen mit Mindestanforderungen. Dazu werden Begrifflichkeiten festgelegt und Regeln zur Abbildung der physischen Welt beschrieben. RAMI 4.0 lässt sich von dem Konzept der Industrial Internet Reference Architecture (IIRA) abgrenzen, da IIRA die branchenübergreifenden Gemeinsamkeiten sowie Interoperabilität über die Branchen hinweg betont, wohingegen RAMI 4.0 sich auf die Wertschöpfungsketten innerhalb der produzierenden Industrie konzentriert. [31]

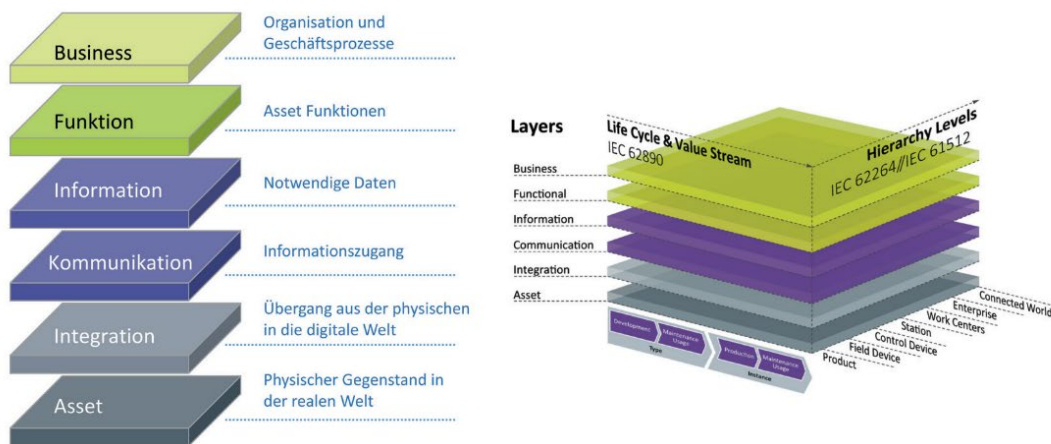


Abbildung 4: RAMI 4.0 Modell [63]

## Digitales Typenschild

Für die Verknüpfung der physikalischen Objekte und deren digitalen Abbildungen ist eine robuste, eindeutige Kennzeichnung zwingend notwendig. Mit der DIN SPEC 91406 liegt ein Ansatz vor, der mit einer eindeutigen URL in einem prägnant erkennbaren QR-Code diese Herausforderung löst. [31]

Das Digitale Typenschild erhielt seinen Namen, um zu verdeutlichen, dass es sich um eine Information direkt am Produkt oder am Anlagenteil handelt, wobei das Digitale Typenschild inhaltlich weit mehr abbildet als das, was derzeit auf dem analogen Typenschild zu finden ist. Alle rechtlich notwendigen Informationen und Kennzeichnungen für alle Lebenszyklen des Produkts (beginnend bei der Inbetriebnahme über den Betrieb bis hin zur Abschaltung) sind in digitalisierter und standardisierter Form auf dem Digitalen Typenschild vermerkt. Diese

identifizierenden Informationen können im Kontext des digitalen Zwillings helfen, Anlagen oder deren Komponenten eindeutig zu identifizieren und leisten somit einen Beitrag zur Objektorientierung. Sowohl Hersteller als auch Nutzer profitieren von dem Einsatz Digitaler Typenschilder dadurch, dass notwendige Informationen weltweit, in einer durch den Menschen und maschinell lesbaren Form, mehrsprachig und immer aktuell zur Verfügung stehen. Über digitale Identifikatoren (z. B. QR-Code, Data-Matrix-Code oder RFID-Tag), die direkt am Produkt angebracht werden, wird der Zugriff auf diese Informationen ermöglicht, sodass direkt vor Ort mit jedem Smartphone oder Tablet-PC ein Auslesen erfolgen kann. [64]

### **AutomationML (AML)**

AutomationML ist eine XML-basierte und objektorientierte Datenmodellierungssprache, welche die Modellierung, die Speicherung und den Austausch von technischen Modellen ermöglicht [65]. AutomationML wurde vorrangig für die Modellierung von Produktionssystemen und deren Inbetriebnahme entwickelt und wird derzeit in der IEC 62714 Normenreihe standardisiert. AutomationML ist aus mehreren Gründen ein Befähiger für die Implementierung Digitaler Zwillinge. So fördert AutomationML die Interoperabilität, indem ein Beschreibungsmittel bereitgestellt wird, welches Domänenwissen in Informationsmodelle überführen kann. [31]

Außerdem kann durch AutomationML die Durchgängigkeit in Toolketten des Engineerings realisiert werden, da der Datenaustausch zwischen unterschiedlichen Werkzeugen wie CAD-, Simulations- und Verifikationswerkzeuge nahtlos ermöglicht wird. Zudem sollen die Engineeringdisziplinen wie Maschinenbau, Elektrotechnik und Softwareengineering durchgängig integriert werden, indem die Beschreibung der Topologie einer Anlage, der Prozesse und der physischen Aspekte von Anlageobjekten (Geometrie und Kinematik) standardisiert werden. [66]

Die Ziele von AutomationML lassen sich laut [67] wie folgt zusammenfassen:

- Offenheit (keine Lizenzkosten, freie Verfügung)
- Datenaustausch im Engineering (Basis des durchgängigen Engineerings)

- Hoher Abdeckungsgrad (von der einfachen Komponente bis hin zu komplexen mechatronischen Modellen)
- Hohe Marktdurchdringung (Schließung von Lücken in aktuellen Werkzeugketten)
- Aufgreifen bewährter Datenformate
- Erweiterbarkeit und Standardisierung

## **Verwaltungsschale**

In der Verwaltungsschale werden Assets und deren Eigenschaften beschrieben (Asset Administration Shell – AAS). Die Beschreibung erfolgt gemäß RAMI 4.0 und Asset und Verwaltungsschale sind eineindeutig aufeinander bezogen. Zusammen bilden sie die „Industrie 4.0-Komponente“ oder kurz „I 4.0-Komponente“. Assets können physische Gegenstände sein, wie Geräte, Leitungen usw., aber auch nicht greifbare Dinge, wie z.B. Software, Konzepte, Patente, Ideen, Verfahren und Prozesse. Es kann ein einfaches Asset sein (z. B. ein Rohr) oder ein modulares Asset (z. B. Maschine, Anlage, Fabrik). Der Begriff „Verwaltungsschale“ basiert auf der Idee, dass die Informationswelt das Asset (z. B. Bestandteil einer Industrie 4.0-Komponente) wie eine Schale umschließt und dessen Nutzung ermöglicht (siehe Abbildung 5) [31].

Die AAS ist also die standardisierte digitale Darstellung des Assets und der Eckpfeiler der Interoperabilität zwischen den Anwendungen, die die Fertigungssysteme verwalten. Sie bildet eine Schnittstelle zwischen den physischen und virtuellen Produktionsschritten und ist damit eine virtuelle, digitale und aktive Darstellung einer I4.0-Komponente im I4.0-System. [37]



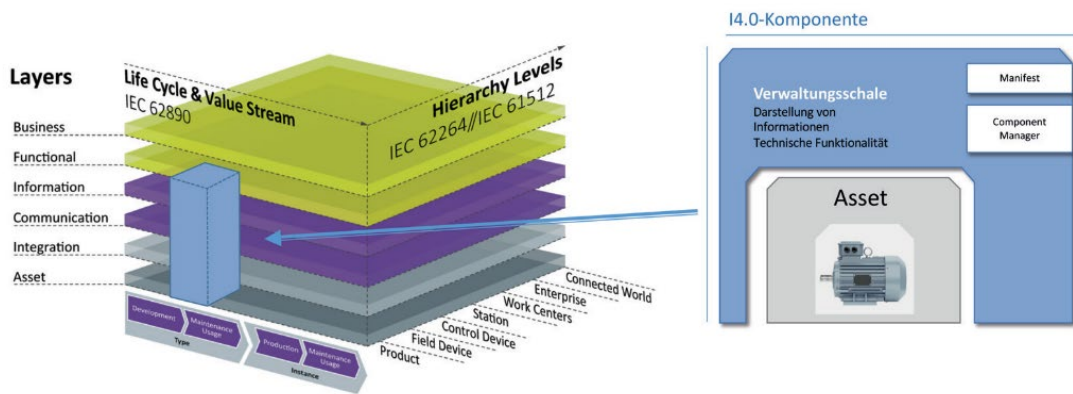


Abbildung 5: Industrie 4.0 Komponente und ihre Einordnung über die entsprechenden RAMI-Schichten hinweg [31, 68]

## 2.3 Einfluss der Entwicklungen auf moderne Produktionssysteme

Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, haben zahlreiche Beiträge hervorgehoben, dass die Industrie von der Digitalisierung in Form von Industrie 4.0 und Digitalen Zwillingen anhand verschiedener Faktoren, z. B. kürzerer Entwicklungszyklen, profitieren wird. Die dargelegten Faktoren ermutigen die Industrie, sich dem Paradigma der Digitalen Zwillinge zuzuwenden. Obwohl im Rahmen von Industrie 4.0-Technologien und intelligenten Systemen bereits viel geforscht wurde, kann eine Umstellung in Richtung einer zunehmenden Digitalisierung aufgrund ihrer enormen Auswirkungen auf ganze Ökosysteme innerhalb von Unternehmen und der gesamten Industrie nicht einfach umgesetzt werden [24]. Die meisten Autoren sind sich dahingehend sicher, dass die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebene durchgängige Digitalisierung einen grundlegenden Veränderungsprozess (Change) erzwingt, denn mit den heutigen Strukturen, Technologien und Methoden ist sie nicht vollständig zu realisieren [12, 28]. Die organisatorische Umsetzung von Industrie 4.0 erfordert daher gezielte Transformationsprozesse, die oft als "digitale Transformation" bezeichnet werden. Sie erfordert neue Denkweisen für den Umgang mit den Herausforderungen der digitalen Transformation sowie eine langfristige Strategie für die Qualifizierung und Akzeptanz der Mitarbeiter [28]. Aber auch die Weiterentwicklung von bestehenden Prozessen und die Adaption innovativer Technologien sind Teil dieses Transformationsprozesses. Aus diesem Grund werden, wie in Abbildung 6 dargestellt, im Folgenden die Auswirkungen der zunehmenden Digitalisierung, speziell die

Entwicklung von Digitalen Zwillingen, auf die drei Dimensionen Technik, Prozesse und Organisation beleuchtet.

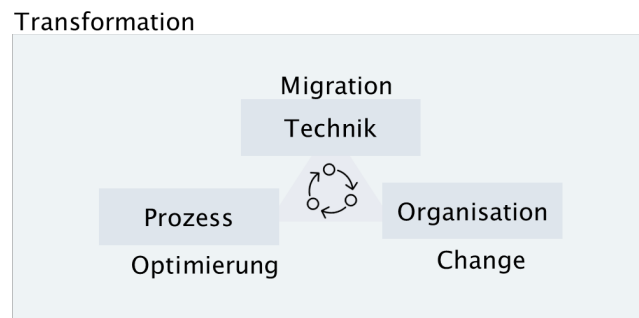


Abbildung 6: Einfluss auf die Dimensionen Technik, Prozess und Organisation

### 2.3.1 Einfluss auf Dimension Technik

Betrachtet man speziell den Aspekt des Anlagenentstehungsprozesses im Kontext Industrie 4.0 und Digitaler Zwilling, so wird deutlich, dass das durchgängige Engineering als eines der drei Charakteristika von Industrie 4.0 essenziell für die Umsetzung des Zukunftsprojekts Industrie 4.0 ist. Die Potenziale von Industrie 4.0 lassen sich nur mit einem durchgängigen Informationsfluss zwischen den einzelnen Schritten des Engineeringprozesses realisieren [9]. Aus zahlreichen Beiträgen lässt sich schließen, dass digitale Zwillinge optimal durch ein eng damit verbundenes Konzept umgesetzt werden können, das als "digitaler Faden" bekannt ist. In seiner höchsten Ausprägung ist ein digitaler Faden ein durchgängiger, nahtloser Datenstrang, der jede Phase des Produktlebenszyklus vom Entwurf über die Herstellung bis hin zur Nutzung im Feld verbindet [69, 70]. Er stellt den Kanal dar, durch den die Daten über das Produkt wandern. Diese Daten – ihre Speicherung, ihr schneller Zugriff, ihre Modellierung und ihre Analyse – ermöglichen es, die Produktion zu modellieren und die Kommunikation in der Lieferkette effizient zu gestalten. [71]

Aktuell sind in der Industrie bereits eine Vielzahl von Informationen über Produktionsmittel, Produkte und Prozesse in den IT-Systemen eines Unternehmens verfügbar. Allerdings sind die Informationsquellen häufig voneinander isoliert, was zu Medienbrüchen und Redundanzen führt. Die Generierung von Nutzen im Kontext des Anlagenentstehungsprozesses aus Sicht der Industrie 4.0 kann folglich nur dann

erfolgen, wenn über unterschiedliche Subsysteme durchgängiges, digitales Engineering als Teil des Digitalen Fadens ermöglicht wird. [18]

Dabei stellt ein gesamtheitliches, digitales Anlagenmodell für Produktionsstätten und deren Prozesse die Grundlage für alle zukünftigen Optimierungen am Anlagenentstehungsprozess dar. Als nicht sinnvoll erscheint dabei, das Anlagenmodell zusätzlich zu den bisherigen Engineering-Prozessen zu erstellen. Daher muss eine Möglichkeit gefunden werden, die bereits derzeit erfolgenden Engineering-Prozesse zu nutzen, um auch das Modell zu erzeugen. Grundsätzlich sind dafür laut [72] mehrere Herangehensweisen denkbar, welche schrittweise das Ziel des durchgängigen Engineerings unter Nutzung durchgängiger Toolketten verfolgen. Im Bereich der Integration von Daten und Funktionen aus heterogenen Software-Werkzeugen können folgende Ansätze beobachtet werden: (1) herstellerspezifische (proprietäre) Ansätze, um die Werkzeuge zumindest innerhalb der Suite eines Herstellers besser zu integrieren; (2) Behelfslösungen oder Adaptertechnologien, die spezielle Lücken zwischen Werkzeugen und Datenbeständen schließen um den Engineeringprozess teilweise zu automatisieren; und (3) hersteller- und toolneutrale Ansätze, um alle heterogenen Software-Werkzeuge und Datenmodelle in einem Engineering Projekt zu integrieren. [72]

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass durch die zunehmende Umsetzung von Technologien aus dem Bereich Industrie 4.0 und Digitaler Zwilling der Bedarf nach durchgängigem Engineering unter Einsatz von durchgängigen, konsistenten Toolketten steigt. Dazu werden standardisierte Datenmodelle und Datenaustauschformate benötigt, um über gemeinsam genutzte Plattformen die Interoperabilität im Anlagenentstehungsprozess sicherzustellen. Diesen Bedarf hat auch das aktuell laufende Förderprojekt DIAMOND erkannt, welches sich mit der branchenübergreifenden Entwicklung von standardisierten Datenmodellen und Datenaustauschformaten beschäftigt [73].

### 2.3.2 Einfluss auf Dimension Prozesse

Der Einsatz heterogener Software-Werkzeuglandschaften bestimmt heute den Engineering-Prozess automatisierter Systeme und verhindert damit die Ausschöpfung

des vollen Potenzials moderner Technologien [58]. Allerdings können sich durch die Kombination von standardisierten Datenformaten wie AutomationML und geeigneten Austausch- und Verwaltungsplattformen für Engineering-Daten Engineering-Prozesse, wie der Anlagenentstehungsprozess, deutlich verbessern. Hierfür müssen die einzelnen Prozesse und Prozessschritte effizienter miteinander verbunden werden und die übergebenen Artefakte so gestaltet werden, dass sie in nachfolgenden Prozessen oder Prozessschritten bestmöglich weiter genutzt werden können, ohne dass sog. Datenverschwendung entsteht [74]. Dadurch ergibt sich die wohl bedeutsamste Entwicklung hin zu einer zunehmenden Parallelisierung der Prozessschritte innerhalb des Anlagenentstehungsprozesses. Bisher ist die Parallelität der Aktivitäten in den einzelnen Prozessen und Ketten oft nur eingeschränkt gegeben. So erfolgt die Verfahrens- und Anlagenentwicklung im Allgemeinen, nachdem die Produkt- und Produktlinienentwicklung abgeschlossen ist. Erst danach wird der Anlagenbau durchgeführt, bevor Anlagenbetrieb und Produktion parallel erfolgen. Diese Abfolge von Prozessen und Ketten ist in ähnlicher Form auch bei Umbauten der Anlagen zu beobachten [75]. In Industrie 4.0 Landschaften ist jedoch davon auszugehen, dass alle vier Wertschöpfungsketten weitestgehend parallel und über den gesamten Anlagenlebenszyklus hinweg durchlaufen werden. [72]

Aber nicht nur die Parallelisierung der Prozessschritte des Anlagenentstehungsprozesses wird eine Folge der zunehmenden Realisierung durchgängigen Engineerings sein. Auch die Inhalte des Prozesses als solchen werden sich verschieben. So bedarf es zur Spezifikation eines durchgängigen Datenmodells zur End-to-End-Nutzung im Prozess zu Beginn einer Erstellung eines Layouts in neutralem Datenformat als sog. Nullpunkt. Gleichzeitig ergeben sich durch die konsistente Verwendung virtueller Modelle zahlreiche potenzielle Prozessschritte zur virtuellen Absicherung, Taktzeitoptimierung oder Machbarkeitsstudien. Auch im späteren Verlauf des Anlagenentstehungsprozesses, beispielsweise bei der Übergabe von der Planung in den Betrieb können Prozessschritte entfallen, da Instandhalter bereits früh am virtuellen Modell trainiert werden können. Vom prozessualen Standpunkt aus ist die durchgängige horizontale und vertikale Integration über unterschiedliche Wertschöpfungsstufen, wie auch über unterschiedliche Ebenen im

Produktionsunternehmen, ein Schlüsselfaktor in der Umsetzung von Industrie 4.0. [66]

### 2.3.3 Einfluss auf Dimension Organisation

Die zunehmende Digitalisierung von Produktionssystemen und –prozessen wirkt sich auch auf die Organisationsstruktur eines Unternehmens aus, an der verschiedene Interessengruppen beteiligt sind, z. B. Instandhalter, Ingenieure und Betriebsleiter. Der Mensch wird auch in künftigen modernen Produktionssystemen der entscheidende Produktionsfaktor bleiben. Damit wird dieser auch über den Erfolg der Einführung von innovativen Technologien entscheiden, da dieser stark von der Akzeptanz durch die Nutzer abhängt. Die Motivation der Menschen, sich an der Umstellung des Produktionssystems zu beteiligen, damit die Transformation erfolgreich verläuft, ist demzufolge von zentraler Bedeutung. [24]

Innovationen und deren Gelingen hängen nicht allein von der Bewältigung technischer Herausforderungen ab, sondern immer auch von einer intelligenten Organisation der Arbeit und der Fähigkeiten der Beschäftigten [76]. Die neue Struktur, geprägt durch Industrie 4.0 und Digitale Zwillinge erfordert neben neuen Entwicklungsmethoden und –werkzeugen auch neue Denkweisen und Mentalitäten zur Bewältigung der digitalen Transformation. Ebenso wird eine Strategie für die Qualifizierung und Akzeptanz der Mitarbeiter notwendig sein, da die Potenziale der Mitarbeiter eine zentrale Rolle spielen [28].

Zukünftig wird der Mensch räumlich verteilte, vernetzte Produktionsressourcen unter Berücksichtigung situations- und kontextabhängiger Zielvorgaben steuern, regulieren und koordinieren müssen. [77]

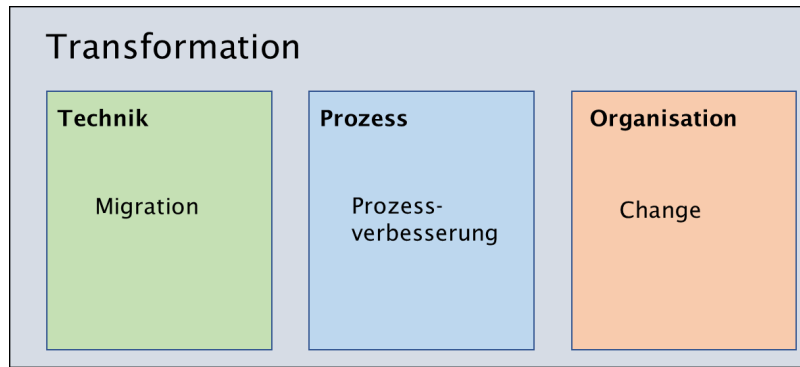
Somit werden sich die Arbeitsinhalte und Arbeitsaufgaben der Mitarbeiter verändern, wodurch teilweise völlig neue Anforderungen an Können, Fähigkeiten, Fertigkeiten und Kompetenzen der Beschäftigten entstehen. Dies kann unter Umständen auch zu starken Widerständen in der Belegschaft führen. Aus heutiger Sicht wird das insbesondere Komplexitäts-, Abstraktions- und Problemlösungsanforderungen

sowie Anforderungen nach selbstgesteuertem Handeln, kommunikativen Kompetenzen und Fähigkeiten zur Selbstorganisation betreffen. [24, 32]

Der Einfluss, den die aktuellen technischen und prozessualen Entwicklungen auf die Organisation haben werden, lässt sich so zusammenfassen, dass der Mensch weiterhin der zentrale Faktor sein wird und dass es entscheidend sein wird, eine geeignete Transformations- und Migrationsstrategie zu entwickeln. Anhand dieser Strategie soll der Wandel weg von gewohnten Technologien und gelebten Prozessen hin zu einem durch die zunehmende Digitalisierung geprägten Umfeld gelingen. Die Strategien werden Aspekte wie Qualifizierung, Personalzusammensetzung, Umorganisationen oder der allgemeinen Schaffung von Akzeptanz durch gezielte Kommunikationsmaßnahmen beinhalten.

#### 2.3.4 Ableitung der notwendigen Charakteristika von Transformationen

Um die Transformation in den drei betrachteten Aspekten Prozess, Technik und Organisation und die damit verbundenen Optimierungen im Anlagenentstehungsprozess, wie z.B. das durchgängige Engineering, zu realisieren, muss die gewählte Transformationsstrategie gewisse Charakteristika aufweisen. Anhand dieser Charakteristika können Unternehmen die für sie passende Strategie wählen oder bereits existierende Ansätze auf ihre Anforderungen anpassen. Die in dieser Arbeit vorgeschlagene Transformationsstrategie soll den Anspruch nach Ganzheitlichkeit im Sinne der Betrachtung von Technik, Prozess und Organisation erfüllen. Zu diesem Zweck wird auf Basis eigener Erwägungen für den weiteren Verlauf folgender Zusammenhang, der Abbildung 7 zu entnehmen ist, zu Grunde gelegt. Demnach besteht eine ganzheitliche Transformation aus den drei Säulen Technik, Prozess und Organisation mit ihren jeweiligen Ansätzen zur Transformation (Migration, Prozessverbesserung und Change) und bildet vor allem einen Rahmen für die optimale Kombination und Integration der Säulen-spezifischen Maßnahmen.



*Abbildung 7: Ganzheitliche Transformation*

Zu diesem Zweck werden im Folgenden in Anlehnung an [24] eine Reihe von Anforderungen an eine Transformationsstrategie definiert, die aus der Literatur abgeleitet wurden, um die Fertigungsindustrie bei der Einführung digitaler Technologien zu unterstützen und den Weg hin zu einem durchgängigen Engineering unter dem Einsatz digitaler Zwillinge zu ebnen.

In der aktuell volatilen Wirtschaftssituation, die geprägt ist durch eine Energiekrise, Ressourcenknappheit und politische Instabilitäten, ist der effiziente Einsatz von finanziellen und personellen Ressourcen wichtiger denn je. Daher ergibt sich, wie auch von [78] vorgeschlagen, folgende Anforderung als **Anforderung 1 (A1): Berücksichtigung Aufwand/Kosten**. Demnach muss eine Transformationsstrategie explizit betrachten, mit welchem Aufwand in Form von Kosten und anderem Einsatz von Ressourcen eine Transformation verbunden ist und dabei entsprechend der finanziellen Situation eines Unternehmens anpassbar sein.

Da viele Unternehmen noch unsicher sind, welche Auswirkungen Industrie 4.0 für sie haben wird, ist in der Literatur die Anforderung zu finden, dass die Transformation **schrittweise** erfolgen soll [79]. Durch eine schrittweise Einführung können organisatorische und kostenbezogene Risiken vermieden werden und die überstürzte, unorganisierte Umsetzung von nur vereinzelt Maßnahmen verhindert werden. Um weiterhin auf Veränderungen, z.B. Systemausfälle, neue Kundenanforderungen und andere Umweltbedingungen, reagieren zu können, sollte der Ansatz nicht nur schrittweise, sondern auch **iterativ** [80] und/oder **zyklisch** [81] erfolgen, um eine kontinuierliche Neubewertung und ggf. Neuausrichtung zu gewährleisten. Weiterhin

definieren [82, 83] das **Denken in Optionen** als Schlüssel zur Verbesserung, da stets berücksichtigt werden muss, dass es verschiedene Möglichkeiten in Bezug auf Technologien und Systemlösungsoptionen gibt, um Digitalisierung zu realisieren. Da stets neue Technologien, Herausforderungen und Möglichkeiten auftreten, muss die Transformation zudem **agil** sein. Durch Agilität kann eine kontinuierliche Verfeinerung der Vorgehensweise unterstützt und die Auswirkungen schwankender Anforderungen abgedeckt werden [84, 85]. Zur besseren Anwendbarkeit der Strategie ist zudem eine **detaillierte Vorgehensbeschreibung** [81, 86] vorteilhaft. Als Zusammenfassung der in diesem Absatz beschriebenen Charakteristika, ergibt sich als zweite Anforderung **(A2) Vorgehensweise (mit den Attributen schrittweise, iterativ, zyklisch und agil)**.

Um die gegebenen Optionen im Spannungsfeld aus Prozess, Technik und Organisation zu entwickeln und zu bewerten, ist die Ganzheitlichkeit des Ansatzes ein wesentliches Kriterium [24]. Nur durch eine Integrierbarkeit der Säulenspezifischen Maßnahmen in eine ganzheitliche Transformationsstrategie kann sichergestellt werden, dass jede der drei Dimensionen durch die Einführung neuer Technologien ihr Optimum erreicht. Demnach lautet die dritte Anforderung **(A3) Eignung für ganzheitliche Betrachtung**.

Der gewählte Ansatz zur Transformation verfolgt unter anderem das Ziel, durchgängiges digitales Engineering zu ermöglichen und dabei neue Technologien in bestehende Unternehmen und deren Prozesse zu integrieren. Aus diesem Grund ist die **(A4) Berücksichtigung von Daten, Tools und IT-Infrastruktur** für alle Säulen der Transformation ein zentraler Aspekt. Diese datenzentrierte Betrachtung ist laut [17] eine zentrale Kompetenz für eine erfolgreiche digitale Transformation.

Um die verschiedenen herausfordernden Aspekte bei der Definition der Transformationsstrategie zu bewältigen, muss das Produktionssystem als ein komplexes soziotechnisches System untersucht werden, in dem die Integration neuer Technologien und die menschlichen Aspekte der Organisation eng miteinander verbunden sind [87]. Konkret bedeutet das, dass die gewählte Strategie unter anderem auch den **(A5) Menschen im Fokus** haben muss, um zu verhindern, dass



organisatorische, kulturelle und soziale Aspekte der Transformation vernachlässigt werden. Daher müssen bspw. auch Bildungs- und Schulungsprogramme bei der Definition der Migrationsstrategie berücksichtigt werden.

Für eine nachhaltige Umsetzung der Transformation in Unternehmen müssen in die Definition der Transformationsstrategie auch die **(A6) Umweltbedingungen**, denen sich das Unternehmen ausgesetzt sieht, einfließen. Unter den Begriff der Umweltbedingungen fallen sowohl interne als auch externe Aspekte [81, 88, 89]. So stellen bspw. die Kunden des Unternehmens eine Form der externen Umweltbedingungen dar und die von der Unternehmensleitung definierte Unternehmensstrategie eine Form der internen Umweltbedingungen.

Die explizite Ableitung der Prozesse im Unternehmen von der Unternehmensstrategie nach dem bekannten Ansatz „structure follows process follows strategy“ [90] bildet die Basis für die siebte Anforderung an die Transformationsstrategie: **(A7) Prozess**. Demnach müssen die bestehenden Prozesse betrachtet, deren Ausrichtung ggf. verifiziert werden und wenn nötig auch Verbesserungen vorgenommen werden [78, 88, 89].

Zusammenfassend werden im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit Transformationsstrategien in Bezug auf die beschriebenen Anforderungen beleuchtet.

## 2.4 Fazit

Die Industrie und deren Produktionssysteme befinden sich auf dem Weg zu intelligenten, vernetzten und virtuellen Fabriken. Die damit verbundenen dynamischen Entwicklungen, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, führten zur Etablierung des Zukunftsprojekts „Industrie 4.0“ der deutschen Bundesregierung. Eine der drei definierten Haupt-Charakteristika von Industrie 4.0 ist die Durchgängigkeit des Engineerings. Neben zahlreichen Potenzialen dieses Aspekts, gibt es grundlegende Herausforderungen bei der Umsetzung, wie etwa die nicht vorhandene Standardisierung, das fehlende Knowhow, der Mangel an Akzeptanz und die Notwendigkeit von durchgängigen Werkzeugketten im Engineering. Neben Industrie 4.0 existiert mit dem Digitalen Zwilling ein weiterer Trend im Bereich der

Digitalisierung. Dazu wird in Kapitel 2.2 hervorgehoben, dass dieser bereits in der Engineering Phase eines Assets entsteht und während des gesamten Lebenszyklus stets dessen exakten Zustand abbilden kann. Auch hier wird fehlende Standardisierung in Hinblick auf Datenmodelle, Datenaustauschformate und Architekturen als größte Herausforderung angeführt. Trotz zahlreicher gewinnbringender Fallbeispiele ist der Literatur auch zu entnehmen, dass die beiden Konzepte noch keine vollständige Integration in die bestehende Industrie realisieren konnten. Um die Einführung und Anwendung zu erleichtern, wird eine ganzheitliche Transformationsstrategie vorgeschlagen. Aus technischer Sicht muss schrittweise das Ziel des durchgehenden Engineerings unter Nutzung durchgängiger Toolketten erreicht werden (siehe Kapitel 2.3.1). Aus prozessualer Sicht kann, wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben, eine Optimierung, z.B. in Form einer Parallelisierung der Sub-Prozesse des Anlagenentstehungsprozesses, erfolgen. In Kapitel 2.3.3 wird aus organisatorischer Sicht verdeutlicht, dass der Mensch auch weiterhin der zentrale Faktor in Produktionssystemen sein wird und demnach zur erfolgreichen digitalen Transformation neue Denkweisen und Mentalitäten entscheidend sein werden. Abschließend werden auf Basis der bisher gewonnenen Erkenntnisse sowie einer Literaturrecherche die notwendigen Charakteristika dieser Transformationsstrategie beschrieben.

### 3 Transformation, Migration, Prozessverbesserung und Change

Digitale Transformation bedeutet, digitale Technologien und Lösungen in alle Bereiche eines Unternehmens zu integrieren. Der Wandel ist dabei nicht nur technologischer, sondern auch kultureller Natur, wie folgendes Zitat zeigt.

*“Which are the factors that, in your opinion, could have affected the migration activity?”. Respondents indicated as the most important factors the human factor (38%), followed by technological factor (32%) [91]*

Abgeleitet von dieser Erkenntnis werden für die Definition einer ganzheitlichen Transformationsstrategie im Rahmen der vorliegenden Arbeit drei Säulen betrachtet. Den **technischen Aspekt** der Transformation soll eine passende Migrationsstrategie abdecken, den **prozessualen Aspekt** eine Strategie zur Prozessoptimierung und den **organisatorischen Aspekt** ein Ansatz des Change Managements. Eingebettet werden diese drei Säulen in ein Rahmenwerk zur digitalen Transformation, welches sicherstellt, dass alle nötigen Faktoren und Rahmenbedingungen betrachtet werden.

#### 3.1 Migrationsprozesse und –strategien

Zur Abdeckung der technischen Aspekte der ganzheitlichen Transformation werden im folgenden existierende Migrationsprozesse und –strategien beleuchtet.

Im allgemeinen Sprachgebrauch bezeichnet der Begriff "Migration" die Umstellung der Technologie von älteren auf neuere Systeme oder die Änderung der Unternehmensstruktur, wodurch das Unternehmen vielseitiger, funktionsreicher und kostengünstiger wird. [92]

In den letzten Jahrzehnten haben sich im Rahmen von Forschungsprojekten in verschiedenen Bereichen verschiedene Ansätze zur Migration entwickelt. In diesem Abschnitt werden die technischen Prozesse und die wichtigsten Migrationsstrategien und –prozesse analysiert.

### 3.1.1 Migrationsprozesse

#### **Mashup [93, 94]:**

Der Mashup-Prozess (MigrAtion to Service Harmonization compUting Platform) wurde von Cetin et al. [93] vorgeschlagen, um ältere Software auf serviceorientiertes Computing zu migrieren. Dieser Migrationsprozess erhält seinen Namen durch die zugrundeliegende Technologie, der sog. Mashup-Technologie. Diese kann als hybride Webanwendung beschrieben werden, welche komplementäre Elemente aus verschiedenen Quellen integriert und zu einem einzigen neuen Service vereint. Die Roadmap besteht aus sechs Phasen (Abbildung 8) und beinhaltet sowohl Verhaltens- als auch Architektur Aspekte des Migrationsprozesses. Die sechs Phasen des Mashup Prozesses lauten: „Model“, „Analyze“, „Map and Identify“, „Design“, „Define“ und „Implement and Deploy“. Im ersten Schritt werden die Anforderungen modelliert, um die funktionalen Anforderungen des Zielsystems zu verstehen. Der Schritt „Analyze“ konzentriert sich auf die vorhandenen Legacy-Systeme und deren technische Details. Der Schritt „Map and Identify“ ordnet die funktionalen und nicht funktionalen Anforderungen in einem iterativen Verfahren entweder älteren Systemkomponenten oder neuen Komponenten zu. Im vierten Schritt wird eine konkrete Mashup Server-Architektur entworfen und weitere technische Details werden identifiziert. Im fünften Schritt werden die Service Level Agreements (SLAs) definiert, welche unter Anderem kontextbezogene Informationen und die Qualitätsmerkmale enthalten. Im letzten Schritt werden die Systemdienste implementiert und bereitgestellt. Der beschriebene Migrationsprozess konzentriert sich speziell auf die Implementierung von serviceorientiertem Computing auf Basis der Mashup-Technologie und kann nur verfolgt werden, wenn die Mashup-Technologie als Ziel der Migration gesetzt ist.

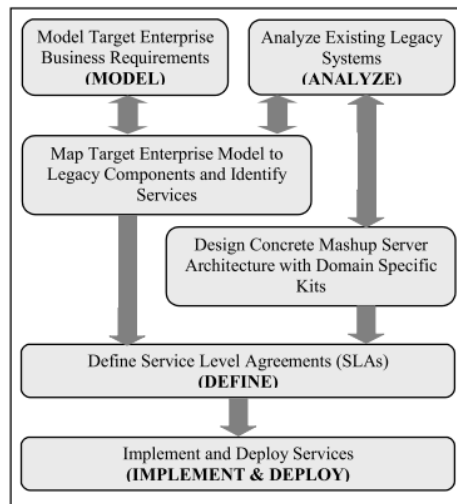


Abbildung 8: Migration nach Mashup [93]

## SOAMIG [94, 95]

Das SOAMIG-Prozessmodell wurde im Rahmen des SOAMIG-Projekts entwickelt, das sich auf die transformationsbasierte Konvertierung in serviceorientierte Architekturen konzentriert. Der SOAMIG-Prozess wird von Zillmann et al. [95] als generisches, anpassungsfähiges und iteratives Migrationsprozessmodell definiert und besteht aus vier Phasen (Abbildung 9): Vorbereitung, Konzeptualisierung, Migration und Übergang. Die Vorbereitungsphase beinhaltet die Sub-Phasen „Pre-Renovation“ (Vorbereitung des veralteten Codes), „Project Setup“ (Definition der Arbeitspakete und Ressourcen) sowie die „Tool Initialization“ (Entwicklung von Reengineering- und Konvertierungswerkzeuge). In der Konzeptualisierungsphase wird die technische Machbarkeit bewertet, um eine Migrationsstrategie zu definieren, die das gesamte Legacy-System iterativ migrieren kann. Im Zuge der Konzeptions- und Migrationsphasen werden die sieben SOAMIG-Kerndisziplinen iterativ durchgeführt: „Business Modeling“, „Legacy Analysis“, „Target Architecture“, „Strategy Selection“, „Realization“, „Testing“ und „Cut Over“. Schließlich konzentriert sich die Übergangsphase auf die Bewertung und Qualitätsverbesserung des migrierten Systems in der Zielumgebung. Laut [24] bietet der SOAMIG-Migrationsprozess eine sehr detaillierte Beschreibung der in jeder Phase durchzuführenden Disziplinen, was zu einer gut strukturierten Aktivitätenabfolge zur Definition einer Migrationsstrategie

führt, die die Wiederverwendung von bestehenden Tools und Code ermöglicht und somit geringen Aufwand und Kosten mit sich bringt.

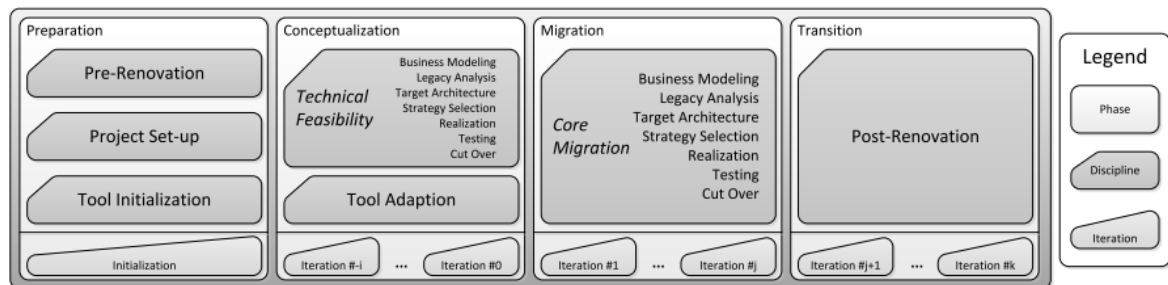


Abbildung 9: Migration nach SOAMIG [95]

### SMART [94, 96]

Im Rahmen des SMART-Projekts (Service Migration and Reuse Technique) werden Altsysteme analysiert, um festzustellen, ob sie mit SOA verbunden werden können. SMART ist ein iterativer Prozess mit sechs Schritten (Abbildung 10): Festlegung des Migrationskontextes, Definition der in Frage kommenden Dienste, Beschreibung der vorhandenen Fähigkeiten, Beschreibung der SOA-Zielumgebung, Analyse der Lücke und Entwicklung einer Migrationsstrategie. Dieser Migrationsprozess wird meist für die Migration von Legacy-Informationstechnologie (IT) zu SOA verwendet.

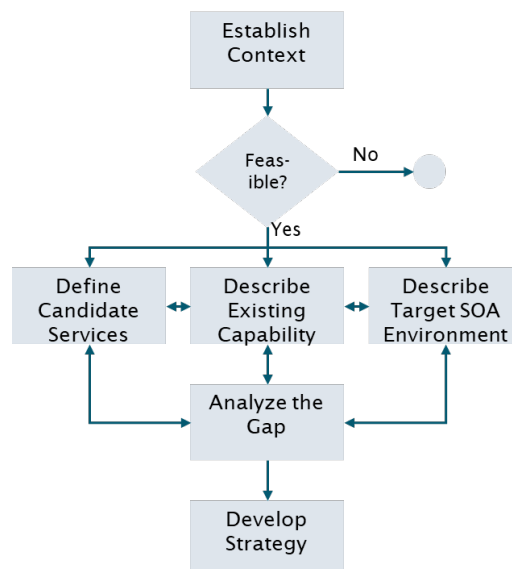


Abbildung 10: Migration nach SMART [96]

## Cloudstep [94, 97]

Der Cloudstep-Entscheidungsprozess unterstützt die Migration von Legacy-Anwendungen in die Cloud, indem er nicht nur die technische Machbarkeit der angestrebten Cloud-Lösung, sondern auch deren Auswirkungen auf das Unternehmen berücksichtigt. Der Prozess basiert auf der Erstellung von vorlagenbasierten Profilen, die das Unternehmen, die Zielanwendung und die in Frage kommenden Cloud-Anbieter charakterisieren. Diese Profile werden dann einer Kreuzanalyse unterzogen, um kritische (technische oder nicht-technische) Einschränkungen, die die Migration in die Cloud behindern könnten, zu identifizieren und möglicherweise zu lösen. Der Prozess besteht, wie in Abbildung 11 dargestellt, aus neun Aktivitäten: Definieren des Organisationsprofils, Bewerten der organisatorischen Einschränkungen, Definieren des Anwendungsprofils, Definieren des Profils des Cloud-Anbieters, Bewerten der technischen und/oder finanziellen Einschränkungen, Umgang mit Anwendungseinschränkungen, Wechsel des Cloud-Anbieters, Definieren der Migrationsstrategie und Durchführen der Migration. Im ersten Schritt ist das Ziel, ein Profil für die Organisation zu erstellen, welches Informationen zu rechtlichen oder administrativen Merkmalen beinhaltet, die für die Migrationsaufgabe relevant sein können. Die Idee besteht darin, die Erkennung potenzieller organisatorischer Einschränkungen, die sich auf die Entscheidung zur Cloud-Migration auswirken könnten, vorwegzunehmen. Im Rahmen des zweiten Schrittes erfolgt eine Bewertung von potenziellen organisatorischen Einschränkungen auf der Grundlage der im Organisationsprofil gesammelten Informationen. Ein mögliches organisatorisches Hindernis kann der Widerstand von Organisationsmitgliedern im Zusammenhang mit der Migration sein. Die dritte und vierte Phase werden parallel durchgeführt und definieren anwendungsbezogene sowie technischen Merkmale und die Charakteristika jedes relevanten Cloud-Anbieters. Im fünften Schritt wird die Konformität zwischen dem Organisationsprofil, dem Anwendungsprofil und dem Profil des potenziellen Cloud-Anbieters bewertet. Bei der Bewertung werden sieben Arten von Beschränkungen berücksichtigt (finanziell, organisatorische, Sicherheits-, Kommunikations-, Leistungs-, Verfügbarkeits- und Eignungsanforderungen). Nachdem die Einschränkungen bewertet sind, kommen mehrere Wege in Frage. Im Fall der Abwesenheit von

gravierenden Einschränkungen, wird die Migration empfohlen und der Prozess geht zum nächsten Schritt über, der die Definition einer passenden Migrationsstrategie beinhaltet. Andernfalls stehen drei Möglichkeiten zur Auswahl: (i) Behebung der Anwendungseinschränkungen; (ii) Auswahl eines anderen Cloud-Anbieters; oder (iii) Abbruch des Prozesses, wenn sich die Einschränkungen als unlösbar erweisen.

Für den Fall, dass der Prozess bis zur Definition der Migrationsstrategie fortgesetzt wird, wird die eigentliche Migration in die Cloud durchgeführt, bei der die Komponenten und Daten der Altanwendung in die Ziel-Cloud Lösung überführt werden.

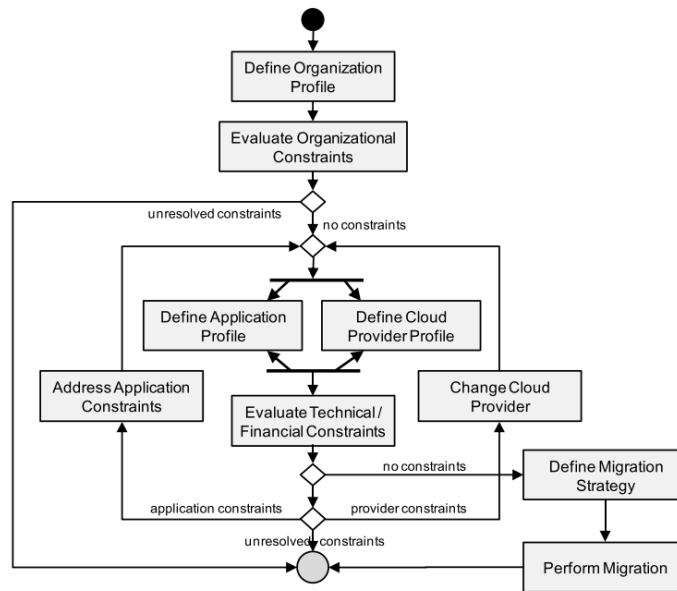


Abbildung 11: Migration nach Cloudstep [97]

### FIVE-PHASED WATERFALL MODEL [98]

Das von [98] vorgeschlagene Wasserfallmodell für die Cloud-Migration basiert auf dem iterativen Wasserfallmodell aus dem Software Development Life Cycle (SDLC) und ergänzt das klassische Wasserfallmodell durch die Einbeziehung von Feedback-Pfaden. Das Migrationsmodell besteht aus den folgenden fünf Phasen (Abbildung 12): Machbarkeitsstudie, Anforderungsanalyse und Planung, Migration, Prüfung und Bereitstellung (Go-Live) sowie Überwachung und Wartung. Der Kerngedanke der Machbarkeitsstudie in Phase 1 besteht darin, festzustellen, ob die Cloud-Migration



finanziell und technisch machbar ist. Dazu wird eine detaillierte Kosten–Nutzen–Analyse durchgeführt, wodurch festgestellt werden, ob die Migration aufgrund zu hoher Kosten, Ressourcenbeschränkungen oder bestimmter technischer Gründe nicht durchführbar ist. In der Planungsphase wird eine detaillierte Bewertung der bestehenden IT–Umgebung durchgeführt, um zu verstehen, welche Anwendungen für die Migration in die Cloud geeignet sind. In der darauffolgenden Migrationsphase werden die ausgewählten Anwendungen in die Cloud migriert und anhand bestimmter Kriterien getestet. In der anschließenden Go–live–Phase werden die relevanten Daten in die Cloud portiert, getestet und freigegeben. In der letzten Phase erfolgt ein gezieltes Monitoring der Cloud–Anwendung in Bezug auf Leistung, Verfügbarkeit und Sicherheit.

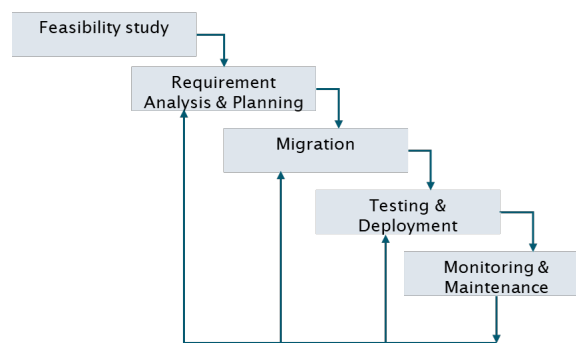


Abbildung 12: Migration nach Five-phased-waterfall-model [98]

### IMC–AESOP [99]

Im Rahmen des EU FP7–Projekts IMC–AESOP [99] wird ein schrittweiser Migrationsprozess hin zu einer serviceorientierten Architektur (SOA) definiert. Der Prozess besteht laut [100] aus vier Hauptschritten (Abbildung 13): Initiierung, Konfiguration, Datenverarbeitung und Steuerungsausführung. In der Initiierungsphase werden die Dienste definiert, die erforderlich sind, um die Legacy Komponenten in die Cloud und in die Basisarchitektur zu übertragen, in die die Legacy–Subsysteme migriert werden können. Während der Phase der Datenverarbeitung werden alle Subsysteme und Komponenten migriert, die keine kurze Reaktionszeit erfordern. In der Phase der Steuerungsausführung werden die beschriebenen bestehenden Funktionalitäten in die SOA überführt. Laut [24] wurde dieser schrittweise Migrationsprozess so konzipiert, dass die funktionale Integration

des Systems und die Echtzeitkontrolle des Betriebs erhalten bleibt und die Risiken betreffend der Systemleistung minimiert werden. Dieser Prozess richtet den Fokus jedoch direkt auf das Ende der Migration und scheint für die Unterstützung einer kontinuierlichen Systemmigration ungeeignet zu sein, da er von Starrheit und Linearität geprägt ist.



Abbildung 13: Migration nach IMC-AESOP [99, 100]

### XIRUP [94, 101]

Der XIRUP-Prozess (eXtreme end-User dRiven Process) konzentriert sich auf die Modernisierung von komponentenbasierten Systemen, die im Rahmen des MOMOCS-Projekts definiert wurden. Wie von Fuentes-Fernández et al. [101] beschrieben, basiert der von ihnen vorgeschlagene modellgesteuerte Prozess auf inkrementellen Iterationen, bei denen die neuen Systemfunktionen nach und nach entworfen und implementiert werden. XIRUP stützt sich auf drei Hauptprinzipien. Erstens wird der Ansatz des Model-Driven Engineering (MDE) mit einer maßgeschneiderten Modellierungssprache und spezifischen Werkzeugen verfolgt. Zweitens wird ein hochgradig iterativer Prozess verwendet, der auf den frühzeitigen Erwerb von Schlüsselwissen ausgerichtet ist. Drittens verwaltet es explizit das in früheren Projekten erworbene Fachwissen. Die XIRUP-Methodik besteht aus vier Phasen: Vorläufige Bewertung, Verstehen, Aufbau und Migration, wie in Abbildung 14 dargestellt.

Die Entscheidung für oder gegen die geplante Modernisierung, wird in der Phase der vorläufigen Bewertung getroffen. Zu diesem Zweck werden die Modernisierungsanforderungen definiert und eine Kosten-Nutzen-Analyse durchgeführt. In der zweiten Phase wird das Schlüsselwissen für die Modernisierung gesammelt. Dieses Wissen umfasst Aspekte des Altsystems, der Zielplattform sowie der Transformationen und Einschränkungen für den Aufbau des modernisierten Systems. Mit diesem Wissen sollen die Modernisierungsaktivitäten unter

Berücksichtigung von Kosten, Nutzen und Risiken bewertet werden. In der darauffolgenden Aufbauphase werden diese Kerninformationen dann für den Rest des modernisierten Systems repliziert, wobei alle Transformationen von Komponenten des Altsystems zu Komponenten des modernisierten Systems festgelegt werden. Schließlich findet in der Migrationsphase der Übergang zum modernisierten System statt, indem ein detaillierter Entwurf der Transformationsmodelle der neuen Komponenten und die Konfiguration mit dem Altsystem erfolgt. Jede dieser Phasen beinhaltet Bewertungsaktivitäten, um den Fortschritt des Modernisierungsprojekts und die Erfüllung der Anforderungen zu beurteilen. Somit ermöglicht dieser Prozess fundierte Entscheidungen, inkrementelle Entwicklung und Wiederverwendbarkeit.

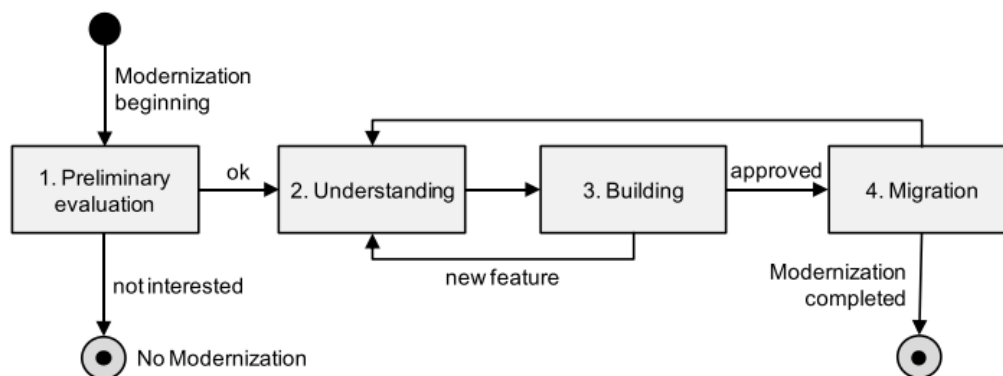


Abbildung 14: Migration nach XIRUP [101]

## PERFoRM [24, 102]

Dieser ganzheitliche Migrationsprozess wurde in [102] vorgeschlagen und lehnt sich an andere industrielle Standard-Engineering-Prozesse an, die zwar für andere Zwecke entwickelt wurden, aber hier auf die Migration zu CPPS angewendet werden. Das Ziel des abgeleiteten Migrationsprozesses ist es, die kontinuierliche Verbesserung eines Produktionssystems in Richtung Industrie 4.0 zu unterstützen. Die 5 Phasen des Migrationsprozesses lauten (Abbildung 15): Vorbereitung, Untersuchung der Optionen, Design, Implementierung und Deployment. In der ersten Phase werden Informationen gesammelt, auf deren Grundlage der Zielzustand definiert wird. Das Hauptziel der Vorbereitungsphase ist die Analyse der aktuellen Situation und die

Bewertung von Möglichkeiten zur Verbesserung des bestehenden Fabriksystems. Zusätzlich wird eine vorläufige Risiko- und Folgenanalyse durchgeführt, sodass das Unternehmen entscheiden kann, ob es möglich ist, mit dem Migrationsprozess fortzufahren, oder ob die Vorbereitungsphase von vorne beginnen muss.

Die Phase der Optionsuntersuchung befasst sich mit der Sammlung und Bewertung verschiedener Migrationslösungen, um die optimalen Migrationsschritte im Hinblick auf die in der vorherigen Phase definierte Vision zu ermitteln. Die Bewertung dieser Migrationsoptionen erfolgt auf Basis der Geschäftsstrategie und der wichtigsten KPI's des Unternehmens. Die Entwurfsphase befasst sich mit der detaillierten Definition der ausgewählten Lösungsoption und ihrer Integration mit den beteiligten Altsystemen. Dazu erfolgt die Spezifikation des Zielsystems und die Definition der Komponenten, wie z. B. von neuen Werkzeugen oder Adaptern zur Verbindung von Alt- und Zielsystem. Anschließend werden Machbarkeitsstudien durchgeführt, um sicherzustellen, dass das System alle erforderlichen Anforderungen erfüllt. Schließlich wird eine Strategie zur Durchführung der Migration ausgewählt. Die darauffolgende Implementierungsphase verfolgt das Ziel der Realisierung der Lösungssystemkomponenten (z. B. Hardware, Software, Betriebsmittel oder Dienste). Die Einführungsphase besteht aus dem eigentlichen Übergang des Produktionssystems in die neu implementierte Lösung und umfasst die Integration und Validierung der Lösung in der realen Produktionsumgebung. Dabei wird besonderes Augenmerk auf die Integration des neuen Systems mit den Altsystemen des Produktionssystems gelegt. Im Rahmen von PERFoRM werden die Systemkomponenten nicht nur im Hinblick auf ihre technische Machbarkeit bewertet, sondern auch in Bezug auf ihre Integration mit der Organisation und den Menschen. Zudem müssen die Produktions-, Wartungs- und Planungsprozesse an die neue Konfiguration der Systeme angepasst werden und menschliche Rollen und Aufgaben müssen auf die neuen technischen und betrieblichen Lösungen abgestimmt werden.

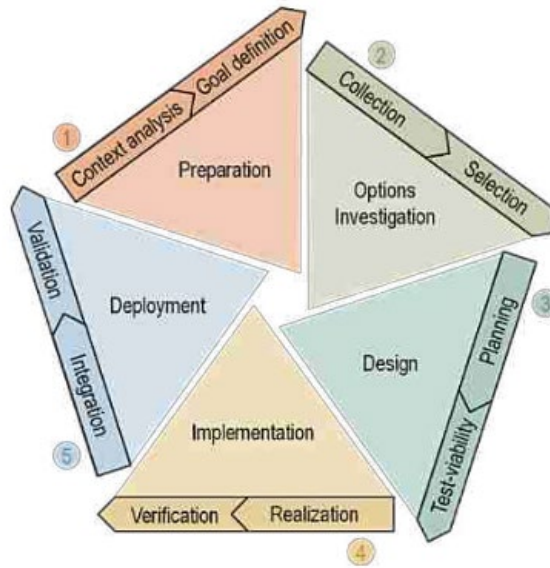


Abbildung 15: Migration nach PERFORM [102]

#### FAR-EDGE [94, 103, 104]

Der im Rahmen des EU-Projekts FAR-EDGE (Factory Automation Edge Computing Operating System Reference Implementation) entwickelte Ansatz wird in [103] als Option für eine reibungslose Migration von alten zentralisierten Architekturen zu den neuen FAR-EDGE-basierten Architekturen vorgestellt. Eines der Hauptziele ist es, die Zurückhaltung der Unternehmen bei der Einführung neuer Technologien in ihre bestehenden Infrastrukturen zu verringern, indem ihnen Strategien zur Verfügung gestellt werden, die einen reibungslosen und risikoarmen Übergang gewährleisten und gleichzeitig die Produktionsqualität verbessern sowie zu einer positiven Investitionsrendite führen. Die Migrationsstrategie beginnt mit dem Schritt "Technische, betriebliche und menschliche Bewertung", in welchem ein klares Bild über den Änderungsbedarf im Unternehmen geschaffen wird, indem die Auswirkungen und Voraussetzungen für diesen Wandel auf technischer, betrieblicher und menschlicher Ebene beleuchtet werden. Durch Fragebögen und Workshops mit Personen, die in den Produktionsprozess involviert sind, werden das Migrationsziel und der Ausgangspunkt definiert. Der Fragebogen mit ca. 60 Fragen dient der Analyse des aktuellen Zustands der technischen, betrieblichen, und menschlichen Dimensionen des Unternehmens wurden in FAR-EDGE definiert.

Auf der Grundlage der Antworten auf diesen Fragebogen werden im zweiten Schritt, "Migrationsmatrix und Szenario Definition", verschiedene Migrationsszenarien entsprechend den möglichen Technologieoptionen untersucht, um die Migrationsalternativen zu ermitteln, die von der identifizierten IST-Situation zur SOLL-Situation führen. Zu diesem Zweck wurde im Rahmen des FAR-EDGE-Projekts ein Tool namens Migrationsmatrix entwickelt, um alle notwendigen Verbesserungen in Richtung der Industrie 4.0-Vision der intelligenten Fabrik zu identifizieren, wobei die digitale Transformation in verschiedene Skalenebenen aufgeteilt wird. Dazu wird eine 5-stufigen Skala des digitalen Reifegrads vorgeschlagen.

Die "Lückenanalyse" im dritten Schritt leitet den Abstand zwischen dem IST- und dem SOLL-Szenario aus der Migrationsmatrix ab und analysiert diesen unter Berücksichtigung von verschiedenen Aspekten. Dazu werden die erforderlichen Komponenten, mögliche Integrationen sowie die Schritte zur Anwendung betrachtet. Erforderliche Komponenten stellen eine detaillierte Liste der zusätzlichen Komponenten, Operationen und neuen Fachkenntnisse dar, die für jede Szenario-Migration erforderlich sind. Weitere mögliche Erweiterungen der Architektur, z. B. die Integration von Komponenten, müssen berücksichtigt werden, um die Flexibilität des Systems und künftige Aktualisierungen zu erleichtern. Anschließend werden die für die Umsetzung der einzelnen Szenarien erforderlichen Schritte definiert. Die Lückenanalyse liefert außerdem eine Kosten- und Zeitbewertung für die gesamte Migrationsabwicklung, was für die wirtschaftliche Analyse im letzten Schritt sehr relevant ist.

Der Schritt "Identifizierung des Mehrwerts" zielt darauf ab, den Aufwand zu rechtfertigen, den das Unternehmen für die Implementierung der Anwendungsfälle betreibt. Dazu werden die (messbare) Auswirkung der einzelnen Migrationsszenarien auf definierte KPI's des Unternehmens und weitere, nicht messbare, Effekte untersucht.

Im letzten Schritt "Wirtschaftliche Analyse" erfolgt eine Kosten-Nutzen-Analyse zur Rechtfertigung der Investition in die Migration. Diese Analyse wird durchgeführt, indem die SOLL-Situation mit der IST-Situation anhand quantitativer Kriterien (z. B.

Total Cost of Ownership, TCO) verglichen wird. Das Ziel dieser letzten Phase ist die endgültige Entscheidung über die Durchführung eines oder mehrerer der definierten Projekte.

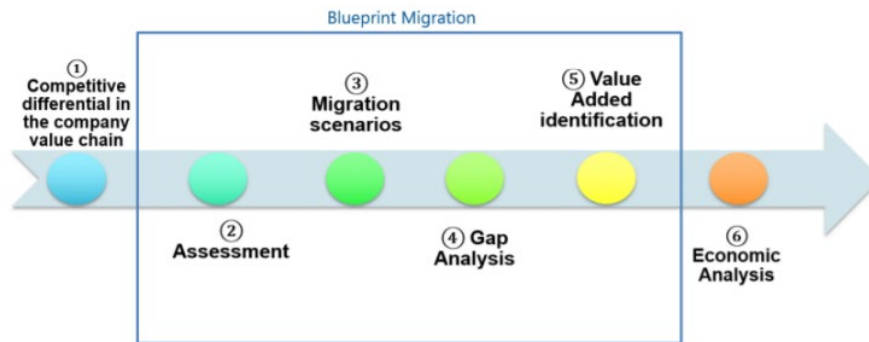


Abbildung 16: Migration nach FAR-EDGE [104]

### 3.1.2 Migrationsstrategien

Neben den bereits beschriebenen Migrationsprozessen spielen auch generelle Migrationsstrategien für die vorliegende Arbeit eine Rolle. Daher werden im Folgenden, die in der Literatur am häufigsten verwendeten Migrationsstrategien zur Umwandlung eines bestehenden Systems in ein anderes System analysiert. Die relevantesten allgemeinen Ansätze, welche in diesem Abschnitt beschrieben werden, lauten "Big Bang", „One Shot“, "Parallel Systems" und "Phased Introduction". Jeder dieser Ansätze hat Vor- und Nachteile, so dass laut [24] nur durch eine intensive Untersuchung des jeweiligen Projekts die am besten geeignete Methode für die Migration von einem bestehenden zu einem neuen System ermittelt werden kann.

#### **Big Bang Strategie [105]**

Die Big Bang Strategie wird in der Literatur auch Cold Turkey, Direct Conversion oder Slam Dunk genannt und wird in der Regel angewendet, wenn das alte und das neue System inkompatibel sind [105]. Dabei kann ein bereits geplanter periodischer Stillstand des Systems eine gute Gelegenheit bieten, um die alten Software- und Hardwaresysteme auf die neuen umzustellen. Diese Strategie kann auch angewendet werden, wenn die Migration eines Produktionssystems betrachtet wird, das kurz vor

einem vollständigen technologischen und organisatorischen Wandel steht, bspw. bei der Einführung eines neuen Produktmodells. [24]

Der "Big Bang" kann daher mehr als eine Systemtransformation bezeichnet werden bei dem das Altsystem vollständig abgeschaltet und das Zielsystem in einer bestimmten Zeit  $\Delta t$  eingeschaltet wird. Die Strategie setzt eine intensive Vorbereitungsphase voraus, in der zum einen das Altsystem sorgfältig analysiert und zum anderen das neue System vor der Implementierung und dem Einsatz mehrfach getestet wird, um die Risiken eines Ausfalls oder einer Beeinträchtigung der Qualität und Leistung des Systems zu minimieren.

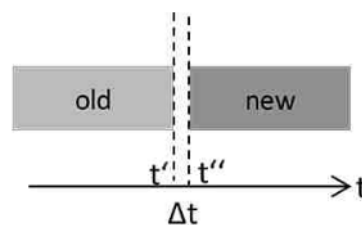


Abbildung 17: Big Bang Strategie [24]

### One-Shot Strategy [92]

Die One-Shot-Strategie wurde von der Big-Bang-Strategie inspiriert, bei der alle durchzuführenden Änderungen in einem einzigen Zeitraum erfolgen, der die Zeit für die Deinstallation des alten Systems und die Zeit für die Installation und Validierung des Zielsystems umfasst. Die Anwendung dieser Strategie erfordert, dass das Zielsystem vollständig definiert und offline validiert wird. Wenn dieses System fertig ist, wird das alte System abgeschaltet und das Zielsystem als integrierte Lösung eingesetzt, die erst nach erfolgreicher Validierung in Betrieb genommen wird. Diese Strategie, die z.B. in der Automobilindustrie weit verbreitet ist, stellt ein hohes Risiko für das Unternehmen dar, da das alte System abgeschaltet wird, was ein Rollback fast unmöglich macht. [92]

### Parallel Systems Strategy[92]

Diese Strategie ist auch als Chicken Little, Trickle oder Parallel Running bekannt und wird vor allem dann eingesetzt, wenn ein generelles Misstrauen in das neue System



vorherrscht oder wenn die Reife des neuen Technologiesystems gering ist, d.h. bei niedrigem Technologiebereitschaftsniveau (TRL). Somit kann diese Strategie für die Migration kritischer Systeme verwendet werden, bei denen ein größerer Systemausfall, verhindert werden muss. Der Grundgedanke dieser Strategie ist, dass das alte und das neue System eine Zeit lang gemeinsam laufen, bis das neue System erfolgreich getestet und validiert wurde und somit bereit ist, das alte System zu ersetzen (Abbildung 18). Dieser Vorgang gleicht einer schrittweisen Einführung des neuen Systems, beginnend mit einigen wenigen Anwendungen, die parallel zu den derzeitigen laufen. Dieser Prozess wird so lange durchgeführt, bis das neue System vollständig implementiert ist. [92]

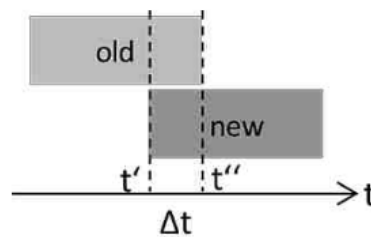


Abbildung 18: Parallel Systems Strategie [24]

### Phased Introduction strategy [106]

Diese stufenweise Strategie wird auch als "Butterfly" bezeichnet [106] und wird oft bei großangelegten Systemablösen eingesetzt, da sie das Risiko minimiert, indem die Migration schrittweise und iterativ betrachtet wird und gleichzeitig eine Notfallposition für das alte System bereitgestellt wird [24]. Die Strategie der schrittweisen Einführung besteht aus einer inkrementellen und iterativen Migration von Altsystemkomponenten in das Zielsystem (Abbildung 19) und kann entweder durch die Einführung des neuen Systems in einer bestimmten Geschäftseinheit erfolgen und dann bereichsweise fortgesetzt werden, oder durch die Implementierung verschiedener unabhängiger Module, bis die vollständige Migration abgeschlossen ist und das neue System für das gesamte Unternehmen verwendet wird [24]. Zu Beginn der Migrationsaktivitäten ist eine eingehende Analyse der Abhängigkeiten, Prioritäten und kritischen Punkte der Systeme erforderlich, um auf Basis dessen die Abfolge der Migrationsphasen zu planen, in denen das Zielsystem Komponente für Komponente

implementiert wird, während die Altsysteme ersetzt werden. Dieser Prozess wird so lange wiederholt, bis die vollständige Implementierung des Zielsystem erfolgt ist. Aufgrund des schrittweisen Vorgehens ist es möglich, feedback-basiert nach jedem Schritt zum vorherigen Schritt zurückzuspringen oder bereichsweise zum alten System zurückzukehren. Die Lösung kann stets erneut analysiert und verfeinert werden, wodurch eine kontinuierliche Verbesserung der Migration erreicht wird.

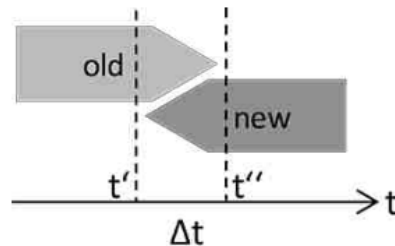


Abbildung 19: Phased Introduction Strategie [24]

Diese vier Strategien bieten alle Vor- und Nachteile, aber keine der Strategien ist per se besser als die anderen. Die Auswahl des Optimalen hängt laut [24] von den geschäftlichen Anforderungen der Organisation selbst, dem betrachteten Umweltkontext und den angesprochenen technischen, wirtschaftlichen und sozialen Bedingungen ab. [24]

### 3.2 Strategien zur Prozessoptimierung

Das Verbesserungsmanagement ist keine neuzeitliche Bewegung, sondern basiert auf einer langen Tradition. Es existieren zahlreiche unterschiedliche Methoden mit dem Fokus, die Kundenbedürfnisse mit effizienten und effektiven Arbeitsabläufen optimal erfüllen zu können. In diesem Kapitel werden die gängigsten Methoden kurz vorgestellt. Es wird aufgezeigt, wie sie entstanden sind, welche Grundprinzipien verfolgt werden und wie sie in der Praxis anzuwenden sind. [88]

#### 3.2.1 KVP

In der Literatur und auch in der Praxis wird die Abkürzung „KVP“ für „Kontinuierlicher Verbesserungsprozess“ oder „Kontinuierliches Verbesserungsprogramm“ verwendet und wird oft auf die japanische Managementphilosophie „Kaizen“ zurückgeführt oder

gar mit dieser gleichgesetzt. Dies trifft insofern zu, als dass bei beiden Methoden die zugrundeliegende Grundhaltung die Mitarbeitenden als zentrale Rolle bei der Optimierung der Arbeitsabläufe identifiziert. Laut [89] unterscheiden sich diese beiden Methoden jedoch darin, die KVP-Methode eher punktuelle Verbesserungen basierend auf einem internen Vorschlagswesen hervorbringt. Demgegenüber ist die Kaizen-Methode umfassender, da sie die Optimierungen systematischer und bereichsübergreifend im gesamten Unternehmen angeht. Das Ziel der KVP-Methode ist demnach die Etablierung eines stetigen Prozesses der Verbesserung, der vor allem die gesamten Mitarbeiterpotenziale systematisch erschließt und dabei nicht etwa revolutionäre Veränderungen oder Erfindungen in den Vordergrund stellt, sondern die zahlreichen inkrementellen Verbesserungen der täglichen Arbeitsprozesse durch die Nutzung der praktischen Intelligenz der Ausführungsebene. [107]

Die zugrunde liegende Denkhaltung ist der zentrale Faktor bei der KVP-Methode, wobei die stetige, kleinschrittige Optimierung der Abläufe unter Einbeziehung der beteiligten Mitarbeitenden von zentraler Bedeutung ist. Die KVP-Methode setzt auf dem Vorgehen zur Prozessoptimierung unter Verwendung des Deming-Kreises auf, welcher aus vier Schritten besteht und nach dem letzten Schritt eine Rückkopplung zum ersten vorsieht (Abbildung 20). Das detaillierte Vorgehen wird im Folgenden beschrieben. [89]

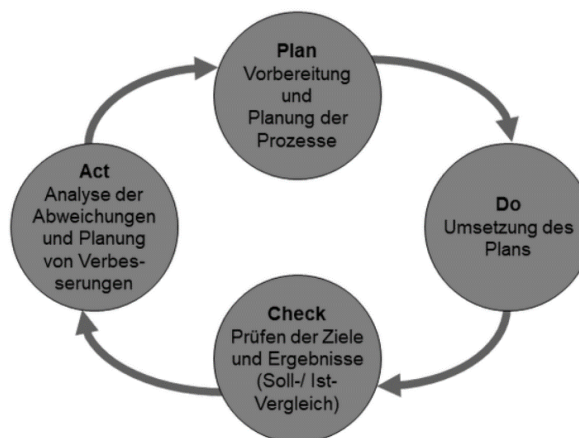


Abbildung 20: Deming-Kreis oder PDCA-Zyklus [89]

In Vorbereitung zur Einführung der KVP-Methode sind zuvor die wesentlichen Voraussetzungen für eine erfolgreiche Umsetzung zu erfüllen. Dazu muss

sichergestellt werden, dass die möglichen Verbesserungsthemen laufend über ein internes Vorschlagswesen oder einen teaminternen Themenspeicher gesammelt werden können. Das interne Vorschlagswesen ist ein Werkzeug, um das Ideenpotenzial aller Mitarbeitenden in einem Unternehmen zu nutzen. Der eigentliche KVP läuft nach dem folgenden Schema ab: Im ersten Schritt (Plan) wird das Verbesserungsthema definiert. Als Grundlage dienen die Vorschläge aus dem internen Vorschlagswesen, welche meist anhand des kurzfristig größten Nutzens bewertet und schließlich priorisiert werden. Im zweiten Schritt (Do) erfolgt die gemeinsame Analyse der Problemfelder. Hierzu empfiehlt es sich, die kritischen Arbeitsschritte direkt am entsprechenden Arbeitsplatz zu beobachten und anschließend die Optimierungen für die einzelnen Problemfelder abzuleiten. Die Umsetzung der Verbesserung erfolgt in Schritt drei (Check) und wird dabei direkt in den entsprechenden Arbeitsablauf eingebaut. Bevor die Änderung verbindlich dokumentiert und vorgeschrieben wird ist es wichtig, dass der angepasste Ablauf zuerst simuliert wird. Dadurch lässt sich feststellen, ob die gewünschte Wirkung erzielt wird oder ob weitere Anpassungen nötig sind. Anschließend können die Anpassungen dokumentiert und in die bestehenden Arbeitsdokumente eingepflegt werden. Im vierten Schritt (Act) erfolgt die Prüfung der Wirkung, wobei nach einigen Wochen im Team ein gemeinsames Review durchgeführt wird. Das Ziel ist die Überprüfung des durch die getroffenen Verbesserungen erzielten Nutzens. Dabei soll auch festgestellt werden, der Arbeitsablauf insgesamt verbessert werden konnte. Sollte dies nicht der Fall sein, wird die KVP-Methode unter Einbeziehung der gewonnenen Erkenntnisse erneut in Schritt eins begonnen. [89]

### 3.2.2 Kaizen

Bei Kaizen [108] handelt es sich um eine Führungsphilosophie mit dem Ziel, die Mitarbeiter zu motivieren bzw. in die Lage zu versetzen, ständig ihre Arbeitsprozesse zu optimieren. Das japanische Wort Kaizen bedeutet wörtlich übersetzt „Veränderung bzw. Wandel zum Besseren“ und beschreibt eine geordnete, kontinuierliche und kleinschrittige Verbesserung. Diese anhaltende Optimierung wird mit einer konkreten Zielrichtung sowie Transparenz und Flexibilität verfolgt, um stetig auf Änderungen der Umwelt zu reagieren. Kaizen wird dabei nicht nur im konkreten Bedarfsfall

eingesetzt, sondern als grundlegende Denkart etabliert. Das Kernelement dieser prozessorientierten Denkart ist die Zielorientierung sowie die grundlegenden Verhaltensweisen im Unternehmen zu verstehen. Konkret bedeutet das, dass im Unternehmensalltag alle Mitarbeiter ständig einen Beitrag zur Verbesserung der Prozesse leisten. [89]

Diese Verbesserung kann aus drei Komponenten bestehen, ist jedoch vor allem durch die Vermeidung von Verschwendung bekannt. Dabei geht es bei Kaizen nicht nur um die eigentliche Verschwendung (Muda) mit ihren sieben Verschwendungsarten (Abbildung 22), sondern vielmehr auch um die Vermeidung von Ungleichmäßigkeit (Mura) und die Beseitigung von Unzweckmäßigkeit (Muri). Erst die Beseitigung dieser 3Ms führt nach [109] zu effizienten und fehlerfreien Prozessen (s. Abbildung 21). [88]

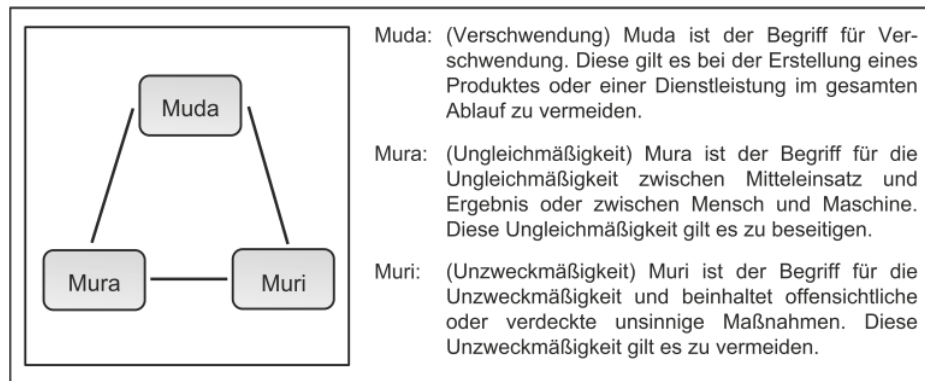


Abbildung 21: Bedeutung der 3Ms [109]

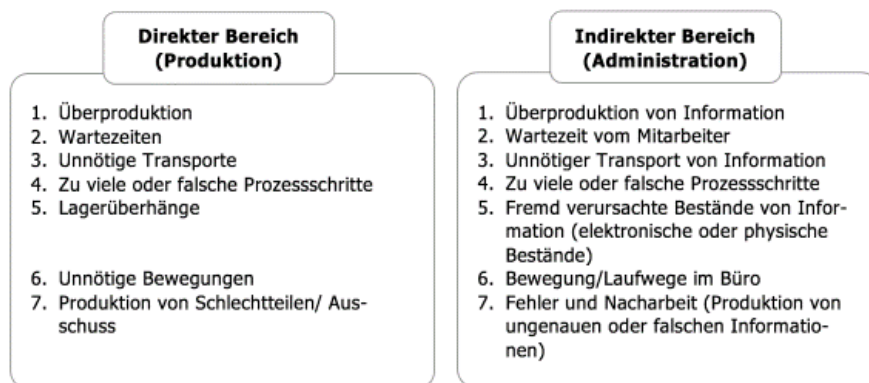


Abbildung 22: 7 Arten der Verschwendung [110]

Bei der praktischen Umsetzung des Kaizen-Prinzips müssen einige Elemente beachtet werden. Das Element der **Verbesserung und Erhaltung** zielt auf die Vermeidung von Verschwendung ab, welche im Sinne von Kaizen bereits bei der Einführung eines neuen Produkts oder Prozesses beginnt. So sollen sich Fehler oder Nachlässigkeiten nach und nach einschleichen, wodurch die Abläufe ineffizient werden und die Produktivität langfristig sinkt. Daher sind Maßnahmen zur Erhaltung oder noch besser Maßnahmen zur schrittweisen Verbesserung der Produkte und Prozesse notwendig, sodass die Verschwendung verhindert wird. Das Element der **Mitarbeiterbeteiligung** ist ebenso von zentraler Bedeutung und soll erreichen, dass alle Mitarbeiter die Denkweise von Kaizen und der kontinuierlichen Verbesserung verinnerlicht haben und selbstverständlich und permanent danach leben. Die Voraussetzung dafür ist, dass die Mitarbeiter aktiv beteiligt werden, indem sie zum Beispiel Freiräume bekommen, in denen sie ihre Optimierungsvorschläge einbringen und umsetzen können oder die Möglichkeit von Lernprozesse eingeräumt werden. Dazu ist auch das nächste Element, das **Training**, notwendig. Denn nur wenn die Mitarbeiter die Methoden und Werkzeuge zur kontinuierlichen Verbesserung kennen, können sie diese einsetzen. Daher ist ständiges Training mit anschließender Umsetzung äußerst wichtig, um Erfahrungswissen aufzubauen. Doch auch das Element der **Qualitätsorientierung** ist ein wichtiger Baustein der Kaizen-Denkweise. Dazu muss im Unternehmen festgelegt sein, was Qualität bedeutet, indem klar definiert wird, wie die Merkmale und Kennzeichen der perfekten Qualität aussehen. Dabei betont die Kaizen-Lehre auch, dass sich Qualität nicht nur auf Produkte und Dienstleistungen, sondern auch auf die Prozesse bezieht, mit denen diese hergestellt und erbracht werden. Daraus abgeleitet ergibt sich das Element der **Prozess- und Ergebnisorientierung**, da das Denken in Prozessen dazu beiträgt, dass die Aktivitäten zur kontinuierlichen Verbesserung nicht auf einzelne Symptome ausgerichtet sind, sondern darauf langfristig Fehler zu beseitigen. Dazu können auch Prozessveränderungen notwendig sein, da die kurzfristige Gewinnmaximierung nicht das Ziel von Kaizen ist. Auch das Element der **Kunden-Lieferanten-Beziehungen** ist ein Aspekt des Denkens in Prozessen, da das Denken in Form einer Kunden-Lieferanten-Beziehung die Ausrichtung des eigenen Handelns an den Anforderungen dieses internen oder externen Kunden fördert. Als vorletztes Element der Kaizen

Denkweise ist die **Datenorientierung** zu nennen. Dabei geht es um die Quantifizierbarkeit der Qualität der Produkte und Prozesse sowie die Ableitung von Verbesserungspotenzialen. Dies muss auf Basis von messbaren Größen erfolgen, wobei diese Größen nicht immer zählbar sein müssen, sondern auch anhand von anderen prozessrelevanten Daten bestimmt werden können. Zuletzt ist das Element der **Standardisierung und Veränderung** kein Gegensatz innerhalb der Kaizen-Methode. Die Prozesse müssen einerseits möglichst standardisiert sein, damit Fehlermöglichkeiten minimiert werden und andererseits bietet jeder Prozess ständig Ansatzpunkte zur Verbesserung, die es zu erkennen und zu nutzen gilt. Dazu ist die Bereitschaft zur Veränderung wichtig, denn auch standardisierte Prozesse müssen regelmäßig auf den Prüfstand und können jederzeit verändert werden. [111]

Für die erfolgreiche Einführung und Umsetzung von Kaizen im Unternehmen können folgende zwölf Schritte durchlaufen werden, welche sich durch die Aufgliederung des bereits bekannten PDCA-Zyklus (oder Deming Kreis) ergeben [111]:

1. Arbeitsbereich festlegen und abgrenzen
2. Ist- und Soll-Zustand beschreiben
3. Probleme beschreiben
4. Probleme analysieren
5. Lösungsideen entwickeln
6. Lösungen bewerten und auswählen
7. Maßnahmen ableiten
8. Ergebnisse der Analyse präsentieren
9. Maßnahmen vereinbaren und Ressourcen klären
10. Maßnahmen umsetzen
11. Erfolg prüfen
12. Ergebnis weiter verbessern

### 3.2.3 Six Sigma

Der Vorläufer der Entwicklung des Six-Sigma-Konzepts zur Realisierung eines „Null-Fehler-Programms“ geht auf Philip B. Crosby [112] zurück. Dieser entwickelte in den 1960er Jahren das „Zero Defects Concept“ mit der Zielsetzung einer fehlerfreien

Produktion ohne Ausschuss und Nacharbeit . Darüber hinaus wurde das Six-Sigma-Konzept auch von der Deming'schen Qualitätsphilosophie und dem PDCA-Zyklus beeinflusst, welche von W. E. Deming seit den 1950er-Jahren entwickelt wurden. [89]

Six Sigma selbst ist eine Verbesserungsmethode, welche in den Neunzigerjahren des letzten Jahrhunderts bei Motorola entwickelt wurde. Der Grund dafür war, dass die damals vorhandenen Methoden aus Sicht der Erfinder zu wenig klar greifbar und messbar waren. Daher wurde bei der Entwicklung der Six-Sigma-Methode auf einen ausgeprägten mathematischen Ansatz zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Arbeitsabläufen oder Prozessen und deren Outputs gesetzt. Ziel der Methode ist es, mit einer strukturierten Herangehensweise unter Verwendung der entsprechenden methodischen Instrumente wiederkehrende Fehler in den Prozessen zu reduzieren. Ein zentrales Merkmal bei Six Sigma ist die Messbarkeit der Prozessoutputs mittels statistischer Tools, denn die Six-Sigma-Methode stützt sich sowohl bei der Prozessverbesserung als auch bei der Steuerung der laufenden Prozesse stark auf statistisch messbare Daten. Dadurch können bereits kleine Abweichungen exakt und rasch nachgewiesen werden, und entsprechende Korrekturmaßnahmen können zeitnah eingeleitet und umgesetzt werden. [88, 113, 114]

Die Struktur von Six Sigma lässt sich in vier Module gliedern, wobei diese sich in ihrem Aufwand und Komplexität unterscheiden und je nach Komplexität der Fragestellung sowohl einzeln als auch in Kombination angewendet werden können (Abbildung 23).

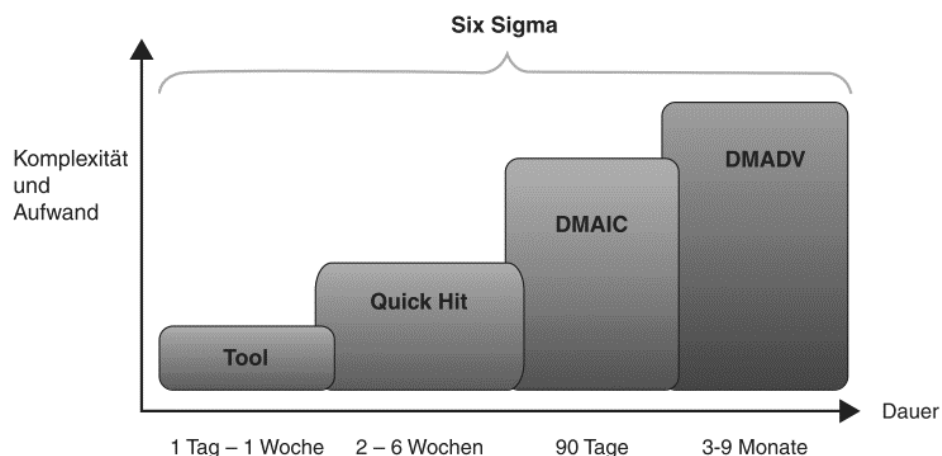


Abbildung 23: Module von Six Sigma [114]



Das erste Modul besteht aus der Six Sigma Toolbox, welche insgesamt 49 Verbesserungswerkzeuge umfasst, die je nach Anwendungsfall einzeln oder in Kombination eingesetzt werden können. Im zweiten Modul, dem sog. Quick Hit, wird eine verkürzte Form des DMAIC-Verfahrens [115] angewendet, um kurzfristige Effekte zu erzielen und so Akzeptanz zu generieren. Mit dieser Methodik werden konkret bestehende Prozesse verbessert. Die Methode besteht aus den Phasen Define, Measure, Analyze, Improve und Control. In der Define Phase werden die zu verbessernden Prozesse unter ausschließlicher Betrachtung der Prozessfakten, wie Daten, Messgrößen und Kennzahlen, ausgewählt. Die zentralen Werkzeuge der Define Phase sind Projekt Charter, SIPOC und CTQ [89]. In der darauffolgenden Measure Phase wird der Ist-Zustand des Prozesses ermittelt, indem anhand von statistischen Kenngrößen (z.B. Fehlerrate, Streuung) eine Prozessfähigkeitsanalyse durchgeführt wird. In der dritten Phase, der Analyze Phase, geht es um die Beurteilung der Prozessleistung [89]. Dazu werden im Rahmen einer Daten- und Prozessanalyse die Leistungen unterschiedlicher Prozesselemente berechnet. Dabei werden die Prozessschritte als wertschöpfend, nicht wertschöpfend oder wertfördernd klassifiziert. Anschließend werden die Probleme identifiziert, die zur eigentlichen Abweichung zwischen Ist- und Soll-Leistung führen sowie die Ursachen, die den größten Einfluss auf den Prozess haben [114]. Die wichtigsten Tools in der Analyze Phase sind laut [89] eine erweiterte Form von SIPOC, das Ishikawa Diagramm und eine FMEA. In der vorletzten Phase (Improve) werden schließlich die konkreten Verbesserungsmaßnahmen definiert. Dabei werden zuerst so viele Lösungsideen wie möglich gesammelt, um anschließend diejenigen auszuwählen, welche die höchste Wirkung auf Kundenzufriedenheit und das wirtschaftliche Ergebnis haben [89]. Die ausgewählten Lösungen werden in einem mehrstufigen Verfahren getestet und verfeinert und durch eine Kosten-Nutzen-Berechnung validiert [113]. Mit diesen Ergebnissen geht es in die letzte Phase, die Control-Phase. Hier erfolgt die Kontrolle des verbesserten Prozesses sowie die Ableitung von weiteren Maßnahmen, falls nötig. In dieser Phase werden außerdem die Übergabedokumente für den Prozess-Owner erstellt, welche unter anderem die Projektergebnisse oder den Implementierungsplan beschreiben. [89, 114]

Das vierte Six Sigma Modul, die Design for Six Sigma-Methode (DFSS) dient der Entwicklung neuer Produkte und Prozesse. Das Ziel dieser strukturierten Vorgehensweise ist es, eine berechenbare und vorhersagbare Produktqualität zu erreichen, die den Kundenanforderungen gerecht wird. DFSS ist ebenso ein phasenbasierter Prozess, wobei für jede Phase spezifische Aktivitäten, die zu verwendenden Werkzeuge sowie die erwarteten Ergebnisse definiert sind. Es sind allerdings, anders als bei DMAIC, eine Vielzahl von verschiedenen Phasenmodellen und damit Akronyme (z.B. DMADV, DMADOV, IDOV, DCCDI) in der Literatur beschrieben, da sich bisher kein einheitlicher Standard etabliert hat [114]. Ausschlaggebend für die Auswahl des passenden Phasenmodells ist der Entwicklungszweck (Produkt-, Service- oder Prozessdesign), für den DFSS verwendet werden. [89]

#### 3.2.4 Business Reengineering

Der Begriff Business Reengineering wurde um 1990 in den USA geprägt und unterscheidet sich zu den Methoden der kontinuierlichen Verbesserung der Arbeitsabläufe (z. B. Kaizen oder Six Sigma) darin, dass nicht die bestehenden Prozesse optimiert werden sollen, sondern eine radikale Neugestaltung der wesentlichen Prozesse inklusive der gewachsenen Organisation angestrebt wird. Beim Business Reengineering geht es um die Frage, wie die Abläufe hinsichtlich der aktuellen Marktanforderungen und der neuesten technologischen Möglichkeiten so effizient wie möglich gestaltet werden können. [88]

Dabei ist eine iterative oder kleinschrittige Umsetzung der Verbesserungen nicht möglich. Michael Hammer und James Champy [116], die Entwickler der Methode, definieren diese wie folgt: „Business Reengineering ist genau genommen ein fundamentales Überdenken und ein radikales Redesign von Unternehmen oder wesentlichen Unternehmensprozessen. Das Resultat sind Verbesserungen um Größenordnungen in entscheidenden, heute wichtigen und messbaren Leistungsgrößen in den Bereichen Kosten, Qualität, Service und Zeit“.

Als großen Vorteil des Business Reengineering gegenüber den herkömmlichen Verbesserungsmethoden kann die Unabhängigkeit von bestehenden und historisch

gewachsenen Arbeitsabläufe und festgefahrenen Strukturen genannt werden. Wichtig ist die Ausrichtung an den Unternehmenszielen und die daraus ableitbaren, optimalen Prozesse. Die top-down Entwicklung und Einführung der Prozesse ist schneller und bringt radikalere Veränderungen als eine kontinuierliche Weiterentwicklung mit Einbeziehung der jeweiligen Mitarbeitenden. Es liegt nahe, dass dieses kompromisslose Vorgehen auch wesentliche Gefahren birgt, denn mit der konsequenten Neugestaltung der Prozesse und Arbeitsabläufe werden auch funktionierende und eingespielte Prozesse ersetzt. Dadurch geht einerseits wertvolles Know-how verloren und andererseits dauert es einige Zeit, bis die neuen Arbeitsabläufe eingespielt sind und reibungslos funktionieren. Dies führt in der Übergangsphase zu Ineffizienzen im Prozess sowie zu vermehrten Qualitätsproblemen und fehlender Akzeptanz durch die Mitarbeitenden. Die Festlegung der Prozesse kann sich auch auf die Zusammenstellung der Teams und Abteilungen auswirken und dementsprechend die Organisationsstruktur beeinflussen. Es wird vermehrt auf integrierte Prozesse, multidimensionale Berufsbilder und Prozessteams gesetzt. [88]

Durch den radikalen Ansatz und die resultierenden Veränderungen bringt das Business Reengineering Unsicherheiten und Risiken mit sich und ist dementsprechend nicht einfach durchzusetzen. Daher sollte die Neugestaltung von Prozessen im Business Reengineering primär auf verbesserungswürdige Kernprozesse mit einer hohen strategischen Bedeutung angewendet werden.

### 3.2.5 Agile Methoden

Agile Methoden wurden ursprünglich als Vorgehensweisen für die Softwareentwicklung entwickelt, wobei die Phasen Planung, Design, Entwicklung und Test in einen iterativen Lebenszyklus integriert werden sollen, um in regelmäßigen Abständen funktionierende Inkremente zu liefern [117]. Der Vorteil dieser agilen Entwicklung ist das Potenzial der schnelleren Wertschöpfung, da die Inkremente, also funktionierende Software-Releases häufiger beim Kunden ankommen. Diese zeitlich orientierte, iterative und inkrementelle Entwicklung bildet die Grundlage der agilen Vorgehensweise [118]. Der Vorteil gegenüber der traditionellen Wasserfall-Methodik

besteht in einer effektiven Fortschrittskontrolle, einer Verkürzung der Reaktionszeit bei Fehlern sowie einer Risikominimierung durch wiederholte Iterationen [119]. Die wichtigsten Eckpunkte und Regeln der agilen Arbeitsweise wurden im Agilen Manifest von 2001 definiert und lauten [120]:

- Individuen und Interaktionen vor Prozessen und Werkzeugen
- Funktionierende Software statt umfassender Dokumentation
- Zusammenarbeit mit dem Kunden statt Vertragsverhandlungen
- Reagieren auf Veränderungen statt Befolgen eines Plans

Mit diesen Werten betont die Agile Bewegung nicht die Umsetzung des einen zum Preis der Abschaffung des anderen, sondern legt fest, welche Aspekte im Zweifelsfall zu priorisieren sind. So sind in erster Linie die Teambeziehungen im Gegensatz zu striktem Befolgen von vorgegebenen Entwicklungsprozessen und Werkzeugen zu bevorzugen. Außerdem wird mehr Wert auf funktionierende Software gelegt, als zu viel Zeit für die Dokumentation des zu entwickelnden Produkts aufzuwenden. Drittens wird der Kunde während des gesamten Entwicklungsprozesses als Mitwirkender und weniger als auftraggebender Vertragspartner betrachtet. Zuletzt sollen Änderungen immer als Projektverbesserungen betrachtet werden, die einen zusätzlichen Wert darstellen und dabei nicht die strikte Befolgung eines Plans im Vordergrund stehen. Betrachtet man den Kontext der Industrie 4.0, der von Komplexität und sich verändernden Anforderungen an die Wertschöpfungsprozesse geprägt ist, reichen agile Methoden laut [24] allein nicht aus, um die Herausforderungen zu meistern. Eine ausgewogene Kombination von Ansätzen, wie beispielsweise Lean und Agile, kann jedoch die komplexe Definition einer digitalen Transformation unterstützen, da auf diese Weise offene technische, prozessuale und organisatorische Fragen geklärt werden können [121]. Wenn die gewünschte Zielsituation sowie der Weg dorthin unklar sind, kann ein iterativer Ansatz gut geeignet sein, um sowohl das "Was" als auch das "Wie" zu klären und mit der einhergehenden Unsicherheit umzugehen [122].

Ein Ansatz, der diese Art von Prozessentwicklung fördert, nennt sich Toyota Improvement Kata [123] – ein strukturiertes und iteratives Vorgehen für die

kontinuierliche Verbesserung von industriellen Prozessen, die mit Unsicherheit, d.h. Hindernissen, Komplexität und Unklarheiten zu kämpfen haben. Das Improvement Kata beschreibt ein vierstufiges Modell zur Zielerreichung innerhalb von Organisationen: (Abbildung 24) [123]:

1. Berücksichtigung der langfristigen Vision oder Richtung
2. Erfassen des Ist-Zustandes
3. Definition des nächsten Zielzustands in Richtung der Vision
4. Iterative Annäherung an diesen Zielzustand durch Aufdecken der Hindernisse, an denen gearbeitet werden muss.

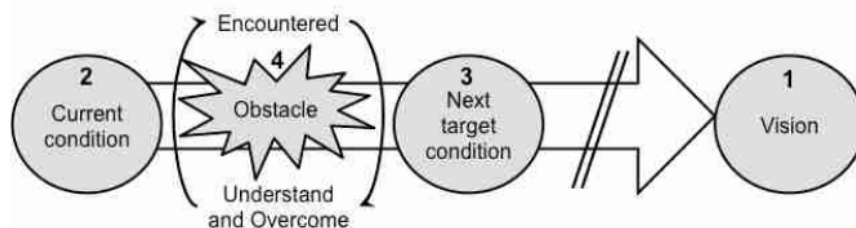


Abbildung 24: Improvement Kata [123]

Das Modell besteht im Wesentlichen darin, zu einem gegebenen Zeitpunkt einen Zielzustand zu definieren, der auf die (teilweise) Verwirklichung der langfristigen Vision einzahlt. Sobald dieser Zielzustand definiert ist, wird eine Reihe von Plan-Do-Check-Act (PDCA)-Zyklen [124] durchlaufen, um diesen Zustand zu erreichen. Nach jedem Zielzustand werden die vier Schritte des Improvement Kata wiederholt, bis die langfristige Vision erreicht ist. Nach [24] führt diese Vier-Schritte-Routine eine Denk- und Handlungsweise ein, die auf Veränderung, Verbesserung und Lernen zugeschnitten ist und so auf einen Migrationsprozess im Kontext der Industrie 4.0 übertragen werden kann.

### 3.3 Organisatorische Change Prozesse

Der Wandel, der durch neue technologische Möglichkeiten sowie aufgrund von wirtschaftlichen Herausforderungen in Unternehmen nötig ist, zieht die umfassende

Umgestaltung von Prozessen und Organisationen nach sich. Aus diesem Grund lassen sich in der Literatur zahlreiche Beiträge finden, die sich mit der Frage befassen, wie Veränderungen eingeführt, umgesetzt und unterstützt werden können, die sich auf die Rolle und die Arbeit der Menschen in den Organisationen auswirken. Im Folgenden werden die für die vorliegende Arbeit relevanten Ansätze vorgestellt.

### 3.3.1 Lewin

Der Sozialwissenschaftler Kurt Lewin führte das im Folgenden beschriebene dreistufige Veränderungsmodell in den 1950er Jahren ein [125]. In Lewins Ansatz wird das Verhalten als ein dynamisches Gleichgewicht von Kräften, die in entgegengesetzte Richtungen wirken betrachtet. Dabei erleichtern treibende Kräfte den Wandel, weil sie die Mitarbeiter in die gewünschte Richtung drängen, wohingegen hemmende Kräfte den Wandel behindern, weil sie die Mitarbeiter folglich in die entgegengesetzte Richtung weisen. Diese Kräfte sollen nach Lewin analysiert und kanalisiert werden, um das Gleichgewicht in Richtung der geplanten Veränderung zu verschieben. [81]

Lewin betont jedoch auch die Schwierigkeit von Veränderungen in sozialen Gruppen, da jeder Versuch, eine Veränderung zu erzwingen, eine Zunahme der gegensätzlichen Kräfte hervorrufen kann [126] und diese Veränderungen Auswirkungen auf die Teilnehmer der sozialen Gruppe (z.B. Arbeitnehmer) haben, die in den meisten Fällen Reaktionen wie Besorgnis, Angst und Unsicherheit beinhalten. Diese Gefühle können sich zu Widerstand entwickeln [127] und um ebendiesen Widerstand zu verhindern bzw. zu überwinden, schlägt Lewin einen dreistufigen Prozess vor: (i) Entfrostern, (ii) Bewegen und (iii) Einfrieren. Der erste Schritt zielt darauf ab, das Gleichgewicht, das dem Status quo entspricht, aufzutauen, so dass die derzeitigen Verhaltensweisen unbequem werden und abgelegt werden. [8]

Dieses Auftauen kann nach Lewin anhand von drei Methoden erreicht werden. Zum einen durch die Verstärkung der treibenden Kräfte, die das Verhalten von der bestehenden Situation (Status quo) wegführen. Oder durch die Verringerung der hemmenden Kräfte, die sich negativ auf die Abweichung vom bestehenden Gleichgewicht auswirken und zuletzt durch eine Kombination der beiden oben genannten Methoden. In der Literatur sind einige Aktivitäten zu finden, die den Schritt

des Auftauens unterstützen können, z. B. Motivation der Teilnehmer durch Vorbereitung auf die Veränderung, Aufbau von Vertrauen und Anerkennung der Notwendigkeit einer Veränderung sowie die aktive Beteiligung an der Erkennung von Problemen und der Erarbeitung von Lösungen innerhalb einer Gruppe. [81, 128]

Der zweite Schritt besteht in einem Prozess der Bewegung und der Suche nach akzeptableren Verhaltensweisen. In diesem Schritt muss das Zielsystem auf ein neues Gleichgewichtsniveau gebracht werden. Zu den drei Maßnahmen, die bei diesem Schritt helfen können, gehören: die Mitarbeiter davon zu überzeugen, dass der Status quo nicht vorteilhaft für sie ist, und sie zu ermutigen, das Problem aus einer neuen Perspektive zu betrachten, gemeinsam nach neuen, relevanten Informationen zu suchen und die Ansichten der Gruppe mit angesehenen, mächtigen Führungskräften zu verbinden, die die Veränderung ebenfalls unterstützen. [8, 81]

Der dritte Schritt des dreistufigen Veränderungsmodells von Lewin ist das "Refreezing". Dieser Schritt erfolgt nach der Umsetzung der Veränderung, damit diese auf Dauer Bestand hat, da es laut Lewin sehr wahrscheinlich ist, dass die Veränderung nur von kurzer Dauer ist und die Mitarbeiter zu ihrem alten Gleichgewicht (Verhalten) zurückkehren, wenn dieser Schritt nicht durchgeführt wird. Der dritte Schritt zielt auf die tatsächliche Integration der neuen Werte in die Denkweise und Traditionen der Gemeinschaft ab. Der Zweck des „Refreezing“ ist demnach die Stabilisierung des neuen Gleichgewichts, indem sowohl die treibenden als auch die hemmenden Kräfte harmonisiert werden. Eine Maßnahme, die in der Literatur zur Umsetzung von Lewins drittem Schritt genannt wird, ist die Verstärkung der neuen Muster und ihre Institutionalisierung durch formelle und informelle Mechanismen, einschließlich Richtlinien und Verfahren [128]. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Lewins Modell die Auswirkungen von Kräften, die den Wandel entweder fördern oder hemmen, veranschaulicht. Ein Wandel findet demnach nur dann statt, wenn die Stärke einer treibenden Kraft größer ist als die der entgegengesetzten Kräfte [81, 128].

### 3.3.2 Prosci ADKAR Model

Das ADKAR-Modell wurde entwickelt, um Veränderungen "in Unternehmen, Regierungen und unserer Gemeinschaft" umzusetzen [129]. Dieses Modell stützt sich

auf die Prinzipien des Wandels, die auf individueller Ebene wirksam sind und konzipiert diese so, dass sie auf eine große Gruppe von Personen oder sogar eine ganze Organisation übertragen werden können. ADKAR ist ein Akronym, das für Awareness, Desire, Knowledge, Ability and Reinforcement steht. Jeder dieser Begriffe stellt einen Bestandteil des Änderungsprozesses dar und soll in der angegebenen Reihenfolge durchgeführt werden. Dieses Modell setzt den Schwerpunkt bei den beteiligten Menschen, so wird im ADKAR-Vorgehen keine Liste von Schritten zum Projektabschluss genannt, sondern betont, wie den Menschen ein Wandel erleichtert werden kann. Dazu werden die folgenden Ansätze genutzt:

**Awareness** – Um eine Veränderung zu initiieren, muss ein Individuum wissen, was sich ändern muss und warum. Dazu sollen dem Individuum die Risiken einer Nicht-Änderung bekannt sein sowie die Chancen, die sich durch eine Änderung ergeben. Ohne dieses Bewusstsein des Bedarfs an Veränderung, entsteht kein konkreter Wunsch nach einer Änderung.

**Desire** – Sobald das Bewusstsein für den Bedarf nach einer Änderung vorliegt, ist es notwendig, ein Individuum bei der Formulierung des Wunsches nach Wandel zu unterstützen. Im Rahmen eines organisatorischen Wandels muss also definiert werden, welche Maßnahmen erforderlich sind, um den Änderungswunsch bei den Mitarbeitern herbeizuführen. Dazu kann den Mitarbeitern beispielsweise demonstriert werden, wie in der Vergangenheit erfolgreiche Wandlungsprojekte durchgeführt wurden und welche Erfolge und Vorteile diese mit sich bringen. Dadurch kann sowohl die intrinsische als auch die extrinsische Motivation geweckt werden. Intrinsische Motivatoren sind individuell und spezifisch und motivieren einen Einzelnen. Extrinsische Motivatoren können jede Art von Motivation sein, die von außen an den Mitarbeiter herangetragen werden. Dazu zählen Boni, Arbeitsplatzsicherheit, Beförderungen oder auch nur Ermutigung von Kollegen oder Freunden.

**Knowledge** – Die für den Wandel notwendigen Informationen müssen den Beteiligten transparent vorliegen. Dazu gehören Informationen zu neuen Programmen, Systemen oder Verhaltensweisen, die implementiert werden. Die Bereitstellung aller Informationen ist wichtig, da Individuen ihr Verhalten mit einer großen



Wahrscheinlichkeit nicht verändern, solange sie nicht verstehen welche Folgen diese Änderung nach sich ziehen wird.

**Ability** – In diesem Schritt wird Wissen zu Aktion. Da allerdings das Wissen allein oft nicht ausreicht, um die zum Wandel notwendigen Schritte auszuführen, sollten Organisationen nach dem ADKAR-Modell die Mitarbeiter dabei unterstützen. Dazu können beispielsweise gezielt Experten eingesetzt werden, die bei Unklarheiten oder Problemen beratend zur Seite stehen. Auch den Führungskräften kommt eine wichtige Rolle bei der Unterstützung zu.

**Reinforcement** – Bei diesem Schritt ist die Vermittlung von Erfolg im Fokus. Die kleinen Erfolge zu feiern, kann der Schlüssel zur weiteren Umsetzung einer Veränderung sein. Die Anerkennung eines Gruppenerfolgs ist dabei ein wichtiger Aspekt, ergänzt aber nur die individuelle Anerkennung einer Respektsperson, die laut der ADKAR-Methode besonders wirksam ist.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die ADKAR-Prinzipien sich auf die Veränderung von Individuen konzentrieren, aber auch in größerem Maßstab verwendet werden können, um Änderungen in einer Organisation oder Community vorzunehmen. [86]

### 3.3.3 Modell nach Kotter

John P. Kotter [130], Experte für Führung und Change-Management, entwickelte ein Änderungsmodell um die von ihm identifizierten acht größten Fehler bei organisatorischem Wandel zu verhindern. Er konzentriert sich darauf, Veränderungen zu leiten, anstatt sie zu bewältigen, was aus seiner Sicht bedeutet, dass Führung den Wandel anführen muss. Veränderungen in einer Organisation können von unten nach oben vorgenommen werden, aber ab einem gewissen Komplexitätsgrad ist die Einbeziehung des Managements unerlässlich. Ohne diese Unterstützung kann der Änderungsprozess sehr schwierig oder langsam sein. Die folgenden acht Schritte gibt Kotter den Organisationsleitern als Leitfaden für erfolgreiche Veränderungen [86]:

1. Schaffung eines Gefühls der Dringlichkeit für Veränderungen. Das Ziel in diesem Schritt ist das Verständnis aller Beteiligten zu schaffen. Dazu wird das Marktumfeld

analysiert und die potenziellen Bedrohungen oder Möglichkeiten beleuchtet. Die beteiligten Personen müssen verstehen, warum die Änderung erforderlich ist, da nur so eine Änderung angestoßen werden kann. [130]

2. Etablierung einer Leitkoalition. Nach Kotter [130] kann ein umfangreiches Change-Projekt nur dann erfolgreich sein, wenn ein ausreichend großes Team aus verschiedenen Abteilungen und Ebenen dieses vorantreibt und leitet. Er betont die Wichtigkeit der Einbeziehung von möglichst hohen Führungsebenen und die breite Streuung von Wissen und Fähigkeiten in diesem Führungsteam. In großen Unternehmen soll dieses Team aus 20 bis 50 Personen bestehen.

3. Erstellen einer Vision. In diesem Schritt soll ein verständliches und gut kommunizierbares Bild des Ziels erarbeitet werden. Diese Vision geht laut Kotter [130] deutlich weiter als ein klassischer 5-Jahres Plan und gibt eher die Richtung an, in die sich die Organisation bewegt. Zusätzlich soll in diesem Schritt auch die Strategie zur Erreichung der Vision definiert werden. Durch die Vision in Kombination mit einer Strategie kann das Verständnis aller Beteiligten erneut unterstützt werden. Die Vision sollte laut einer von Kotter definierten Daumenregel in maximal fünf Minuten erklärt werden können und dabei von jedermann zu verstehen sein.

4. Kommunikation der Vision. Nach Kotter [130] ist dieser Schritt besonders herausfordernd und gleichzeitig entscheidend. Denn nur wenn die festgelegte Vision ausreichend und angemessen kommuniziert wird, entsteht eine Akzeptanz bei den Mitarbeitern. Die Art und Weise der Kommunikation ist dabei ein wichtiger Faktor. So wäre beispielsweise das alleinige Herausschicken eines Newsletters nicht zielführend. Vielmehr sollte regelmäßig auf verschiedenen Kanälen eine Kommunikation stattfinden. Zur Kommunikation gehören nicht nur die klassischen Medienauftritte, sondern auch die Vorbildfunktion von Führungskräften. Diese müssen die Änderung vorleben und ihre Mitarbeiter ermutigen.

5. Stärkung breit angelegter Maßnahmen. In diesem Schritt sollen Hindernisse beseitigt werden, die dem Änderungsprozess im Weg stehen. Dazu müssen ggf. Systeme oder Strukturen angepasst werden, die eine Bedrohung für die Vision darstellen. Dabei sollen die Beteiligten dazu ermutigt werden, auch Risiken

einzugehen und untraditionelle Ideen und Aktivitäten zu verfolgen. Als Hindernisse nennt Kotter auch Personen, die den Änderungsprozess blockieren oder selbst nicht vorleben. [130]

6. Planung kurzfristiger Erfolge. Im sechsten Schritt werden sichtbare Leistungssteigerungen geplant und umgesetzt. Diese kurzfristigen Erfolge sollen öffentlich anerkannt werden und auch belohnt werden. So können laut Kotter [130] die Mitarbeiter weiterhin motiviert werden und die Akzeptanz in der Organisation gesteigert werden.

7. Konsolidierung der Erfolge und Ableitung weiterer Veränderung. Die durch die Ausweisung kurzfristiger Erfolge entstandene Akzeptanz des Wandels soll in diesem Schritt genutzt werden, um weitere Strukturen und Systeme zu verändern, die weiterhin nicht zur ausgewiesenen Vision passen. Dazu können weitere Mitarbeiter eingestellt oder entwickelt werden, die die notwendigen Fähigkeiten zur weiteren Umsetzung der Vision besitzen. Dem Wandel soll in diesem Schritt weiterer Schwung verliehen werden durch neue Projekte, Aufgaben und ggf. Mitarbeiter. [130]

8. Institutionalisierung der neuen Ansätze. Durch die Betonung des Zusammenhangs zwischen den neuen Ansätzen und dem Unternehmenserfolg kann in diesem Schritt die vollständige Institutionalisierung des Wandels erreicht werden. Dabei ist es auch weiterhin wichtig, die Führungsebene der Organisation komplett auf der Seite des Wandels zu haben und diese als Vorbildfunktionen einzusetzen. [130]

Zusammenfassend lässt sich über Kotters Modell sagen, dass besonders die Vision und das Vorleben dieser Vision durch respektierte Führungskräfte von Bedeutung für den langfristigen Erfolg des Wandels sind.

#### 3.3.4 Lippitt's Phases of Change Theory

Lippitt, Watson und Westley [131] erweitern in ihrem Ansatz Lewins Drei-Schritt-Änderungstheorie und prägen eine siebenstufige Theorie, die sich mehr auf die Rolle und Verantwortung des sog. Change Agents als auf die Entwicklung der Veränderung selbst konzentriert. Der Prozess ist dabei nicht als sequenzielle Abfolge zu sehen, sondern als parallele Aktivitätenserie. Während des gesamten Prozesses werden

kontinuierlich Informationen ausgetauscht [132]. Die sieben Schritte sind in Abbildung 25 dargestellt und lauten:

#### 1. Diagnose des Problems

Der Change Agent analysiert das Problem und schafft bei seinem Kunden ein Bewusstsein für den Änderungsbedarf. Der Kunde soll in dieser Phase eine vertrauensvolle Beziehung zu dem Change Agent aufbauen können und diesem zutrauen, seine Situation zu verbessern.

#### 2. Bewertung der Motivation und Fähigkeit zur Veränderung

In dieser Phase beschäftigt sich der Change Agent mit seinem Kunden und dessen Motivation. Dabei wird weiterhin das Vertrauen in den Change Agent gestärkt und gleichzeitig die Fähigkeit zur Änderung der Organisation evaluiert.

#### 3. Diagnose des System Problems

Anschließend erfolgen eine detaillierte Analyse und Diagnose des System Problems, was laut Lippit, Watson und Westley [131] häufig zu Widerstand des Kunden führt, da dieser die Tragweite des Problems möglicherweise unterschätzt hat. An dieser Stelle profitiert der Change Agent von dem zuvor geschaffenen Vertrauen und kann den Änderungsprozess anstoßen.

#### 4. Definition alternativer Strategien

In diesem Schritt werden Aktionspläne und Strategien entwickelt, um das zuvor definierte Problem zu lösen. Dabei kann sowohl der Kunde als auch der Change Agent aktiv werden, da es wichtig ist, mehrere alternative Vorgehensweisen gemeinsam zu bewerten und die passendste auszuwählen.

#### 5. Umwandlung von Absichten in tatsächliche Veränderungsbemühungen

In diesem Schritt wird die zuvor definierte Strategie umgesetzt. Dabei werden regelmäßig die Fortschritte gemessen und bewertet, sodass der Change Agent eingreifen kann, sobald der Veränderungsprozess ins Stocken gerät.

## 6. Stabilisierung des Wandels

Der erreichte Wandel soll beibehalten werden. Um dies zu erreichen sind Kommunikation, Feedback und Gruppenkoordination wesentliche Elemente in diesem Schritt des Veränderungsprozesses.

## 7. Ende der Beziehung zu Change Agent

Sobald der Veränderungsprozess abgeschlossen ist, wird die helfende Beziehung mit dem Change Agent beendet. Dazu zieht sich dieser im Laufe der Zeit schrittweise von seiner Rolle zurück. Dieser Schritt kann eingeleitet werden, wenn die Änderung Teil der Organisationskultur geworden ist. [81, 131]

Abschließend kann zu dieser Theorie gesagt werden, dass der Erfolg dieses Modells stark von der Wahl des richtigen Change Agents abhängt und diesem bei der Umsetzung viele Freiheiten lässt. Für den Einsatz dieses Modells eignen sich aufgrund der erforderlichen Rahmenbedingungen (Auswahl und Beauftragung eines Change Agents) größere Change-Projekte, die auf einen längeren Zeitraum angesetzt sind.

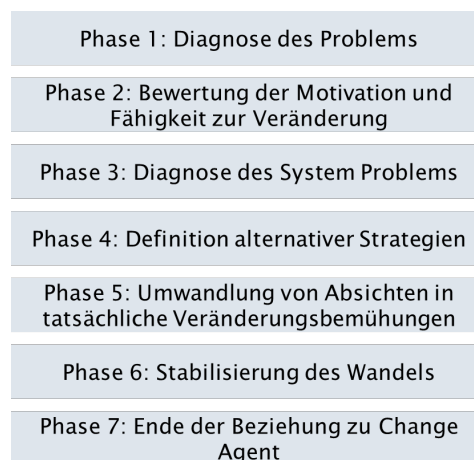


Abbildung 25: Phasen der Lippit's Theorie [131]

### 3.3.5 Prochaska and DiClemente's Change Theory

Ursprünglich war der Zweck von Prochaska und DiClemente's Modell [133] das Änderungsverhaltens eines Patienten in Bezug auf ein seine Gesundheit betreffendes Verhalten zu zeigen. Im Laufe der Zeit wurde dieses Modell auf andere Zielgruppen

ausgedehnt und kann nun als allgemeines Modell für einen Prozess der Veränderung angesehen werden [81]. Die Autoren beschreiben, dass Menschen eine Reihe von Stadien durchlaufen, bevor die tatsächliche Änderung eintritt. Die in ihrer Änderungstheorie diskutierten Stadien sind: Vorkontemplation, Kontemplation, Vorbereitung, Aktion und Wartung [133]. Die Progression durch die Stadien ist, wie in Abbildung 26 dargestellt, zyklisch, nicht linear, da anfangs viele Individuen wieder zurückfallen und ihre Fortschritte nicht erfolgreich aufrechterhalten [81].

Der erste Aspekt des Modells, die Vorkontemplation beschreibt die Situation, wenn eine Person die Probleme nicht kennt oder nicht anerkennt und demnach keine Absicht besteht, das Verhalten zu ändern. Jedoch sind sich Dritte oft bewusst, dass die Betroffenen Probleme haben und üben zum Teil Druck von außen aus, um eine Veränderung herbeizuführen. [133, 134]

In der Phase der **Kontemplation** gewinnen Individuen das Bewusstsein für das Problem und beginnen über eine Änderung nachzudenken. Meist sind die Betroffenen in dieser Phase noch nicht bereit, sich gegenüber dem Veränderungsprozess zu verpflichten [81, 133]. Die nächste Stufe von Prochaska und DiClementes Änderungstheorie ist die **Vorbereitung**. Die Vorbereitung erfolgt, wenn die Person bereit ist, ihr Verhalten zu ändern und plant, dies innerhalb der nächsten zwei Wochen zu tun. Diese Personen benötigen Beratung und Unterstützung, indem gemeinsam das aktuelle Verhalten analysiert wird und Verhaltenskriterien entwickelt werden, die eine mögliche Lösung beschreiben [81, 133, 134]. Kurz darauf folgt die **Aktionsphase**, welche gekennzeichnet ist durch eine Zunahme der Aktivitäten in Richtung einer Verhaltensänderung. Die Person ändert demnach ihr Verhalten, um ihre Probleme zu überwinden und bringt dafür einen erheblichen Zeit- und Energieaufwand auf [133]. Schließlich ist die **Wartung** die letzte Stufe der Änderungstheorie von Prochaska und DiClemente [133]. In dieser letzten Phase werden Maßnahmen ergriffen, um den Wandel zu verstärken, gekoppelt mit der Etablierung der Verhaltensänderung im Lebensstil und den Werten des Individuums. Diese Phase kann sechs Monate bis zur Lebensdauer des Individuums dauern. Eine Beratung zur Vermeidung von Rückfällen ist notwendig, um eine erfolgreiche langfristige Veränderung zu gewährleisten. [81]

In diesem Spiralmodell haben Individuen jederzeit die Möglichkeit, auszutreten, wenn sie sich entscheiden, sich nicht zu ändern, da das Modell Verhaltensrückfälle berücksichtigt und zum zuvor vorhandenen Verhalten zurückkehrt. Laut [81] legt das Spiralmuster des Modells nahe, dass viele Individuen aus ihren Rückfällen lernen, anstatt um das Thema zu kreisen. Das beschriebene Modell ist aufgrund seines Ursprungs unspezifisch und allgemein, kann aber grundlegend auf jeden Veränderungsprozess angewendet werden, unabhängig des betrachteten Umfangs.

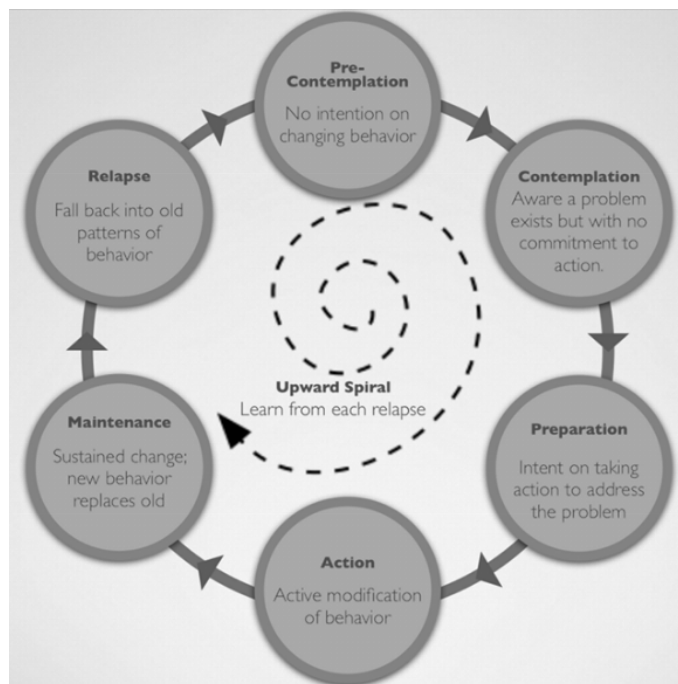


Abbildung 26: Prochaska and DiClemente's Change Theory [133]

### 3.3.6 Social Cognitive Theory

Der Einzelne kann durch direkte Erfahrungen, menschlichen Dialog, Interaktion und Beobachtung lernen. Die Theorie des sozialen Lernens nach [135], die später in soziale kognitive Theorie umbenannt wurde, schlägt vor, dass Verhaltensänderungen durch Umwelteinflüsse, persönliche Faktoren und Attribute des Verhaltens selbst beeinflusst werden. [128]

Die Theorie des sozialen Lernens ist eine Erweiterung der Konditionierungstheorie, da auch hier der Gedanke zugrunde liegt, dass Verhalten das Ergebnis von Konsequenzen ist. Folglich sollten die positiven Erwartungen des Individuums ihre

negativen Erfahrungen überwiegen, damit soziales Lernen möglich ist. Die positiven Erwartungen können sofortige Vorteile, wie angenehme Gefühle, oder langfristige Verbesserungen, wie eine Steigerung des Wohlstands beinhalten. Der Aspekt der Selbstwirksamkeit wird als wichtigster Faktor für eine Verhaltensänderung betrachtet. Soziales Lernen kann in Organisationen unter anderem über Mitarbeiterschulungsprogramme erreicht werden. Dabei sind vier Prozesse zu beachten, die die Erfolgswahrscheinlichkeit des sozialen Lernens deutlich erhöhen können. Dazu gehören: Aufmerksamkeitsprozesse, Retentionsprozesse, motorische Reproduktionsprozesse und Verstärkungsprozesse. Aufmerksamkeitsprozesse berücksichtigen, dass Individuen von einem Modell lernen, wenn sie sich darauf beziehen können und auf seine Details achten, indem das Modell attraktiv und überzeugend gestaltet ist und sich auf etwas bezieht, was das Individuum interessiert. Retentionsprozesse berücksichtigen, in welchem Grad sich eine Person an das Modell und seine Eigenschaften erinnern kann. Motorische Reproduktionsprozesse veranschaulichen, wie ein Individuum seine Beobachtungen und das Gelernte in Handlungen umwandeln kann. Verstärkungsprozesse werden verwendet, wenn eine Person das Verhalten aufgrund von Belohnungen und positiven Anreizen ändert, denn um effektiv zu sein, müssen Modelle einen ausreichend großen positiven Anreiz beinhalten, um die Verhaltensänderung des Individuums langfristig sicherzustellen. [81, 128]

### 3.4 Transformationsstrategien

Die bisher beschriebenen Migrationsstrategien, Modelle zur Prozessoptimierung sowie die Change Management Theorien beleuchten jeweils Veränderungsprozesse mit Fokus auf die technische, prozessuale oder organisatorische Ebene. Im Folgenden werden Strategien und Prozesse der Transformation betrachtet, welche einen ganzheitlicheren Betrachtungsraum überspannen. Da die notwendige Transformation zum einen durch die Digitalisierung begründet ist und zum anderen die Digitalisierung vorantreibt, wird in der vorliegenden Arbeit der Fokus auf die sog. digitale Transformation gelegt. Diese wird von SAP [136] wie folgt definiert:



*„Digitale Transformation bedeutet, digitale Technologien und Lösungen in alle Bereiche eines Unternehmens zu integrieren. Der Wandel ist dabei nicht nur technologischer, sondern auch kultureller Natur.“*

Die Transformationsstrategie zielt darauf ab, die Stoßrichtung für alle laufenden digitalen Aktivitäten innerhalb eines Unternehmens bzw. eines Geschäftsfeldes zu definieren. Sie stellt damit ein zentrales Hilfsmittel dar, um die digitalen Transformationsbemühungen an einem Zielbild auszurichten. Durch diesen bereichsübergreifenden Charakter ergeben sich zahlreiche Schnittstellen zu anderen Strategien, aber die „Leitplanken“ für die digitale Transformation eines Unternehmens werden hier gesetzt. [137]

Im Folgenden werden die für die vorliegende Arbeit wichtigsten Ansätze zur digitalen Transformation kurz beschrieben.

#### 3.4.1 Six Keys to success

Laut Kavadias et al. [138] kann eine Technologie eine Branche nur dann umwandeln, wenn ein Geschäftsmodell mit einem wachsenden Marktbedarf in Verbindung gebracht werden kann. Das Rahmenwerk wurde auf der Grundlage einer eingehenden Analyse von 40 Unternehmen vorgeschlagen, die neue Geschäftsmodelle in verschiedenen Branchensegmenten eingeführt hatten, sowie einer umfassenden Analyse veröffentlichter Branchenberichte z.B. von PwC, EY, McKinsey Global Institute und der Economist Intelligence Unit (EIU) [139].

Durch die Einführung des „Six keys to success“ Modells identifizieren Kavadias et al. [138] sechs Elemente, die eine erfolgreiche digitale Transformation beinhalten sollte. Die sechs Schlüssel, die die Verknüpfung von Technologien und Märkten sicherstellen sollen, lauten: ein stärker personalisiertes Produkt-/Dienstleistungsangebot, ein geschlossener Kreislauf-Prozess, die gemeinsame Nutzung von Vermögenswerten, eine nutzungsbasierte Preisgestaltung und ein stärker kollaboratives Ökosystem sowie eine agile und anpassungsfähige Organisation.[138, 140]

Ein wichtiger Punkt in diesem Rahmenwerk ist die Hypothese, dass "je mehr der sechs Merkmale ein neues Geschäftsmodell aufweist, desto größer ist das Potenzial, eine bestimmte Branche zu verändern" [138, 139].

Laut [139] besteht ein großer Nachteil dieses Modells darin, dass die internen Dynamiken in Unternehmen und Organisationen nicht berücksichtigt werden, die den Erfolg oder Misserfolg bei der Verwirklichung eines transformativen Geschäftsmodells beeinflussen. Außerdem wird die sog. digitale Führung innerhalb einer Organisation nicht berücksichtigt, die eine wichtige Funktion der Organisationskultur darstellt.

### 3.4.2 Digitalization Piano

Im Jahr 2015 schlug Michael Wade [141] ein Rahmenwerk mit dem Namen „Digitalization Piano“ vor, das die kritische Frage der digitalen Transformation beantwortet, d. h. was genau zu transformieren ist. In diesem Rahmenwerk werden von den Autoren sieben verschiedene Kategorien definiert, die die Schlüsselbereiche beschreiben, die in einem Unternehmen digital transformiert werden können [140]. Diese sieben Kategorien lauten: Geschäftsmodell (wie das Unternehmen Geld verdient), Struktur (wie das Unternehmen organisiert ist), Menschen (die Menschen, die für das Unternehmen arbeiten), Prozesse (wie das Unternehmen Dinge tut), Angebote (die Produkte und Dienstleistungen des Unternehmens) und Engagement-Modell (wie das Unternehmen mit Kunden, Lieferanten usw. zusammenarbeitet) [140, 141]. Anhand seines Rahmenwerks versucht der Autor zu erklären, wie eine erfolgreiche digitale Transformation auch zu einem organisatorischen Wandel führen muss, der wiederum zu einer verbesserten Leistung des Unternehmens mit digitalen Technologien und modernen Geschäftsmodellen führt. Der Rahmen ist als "digitales Klavier" konzipiert, in dem jede der sieben Tasten einen der oben genannten Bereiche repräsentiert. Dieser Rahmen verfolgt theoretisch einen umfassenden unternehmensbasierten Ansatz zur Untersuchung der digitalen Unternehmenstransformation durch die Einführung digitaler Technologien. [141]

Laut [139] ist der Nachteil des „Digitalization Pianos“ die ausschließliche Fokussierung auf das Unternehmen selbst, ohne die Komponenten zu betrachten, die die Auswirkungen und den Einfluss externer Faktoren darstellen. Außerdem fehlen in

diesem Rahmenwerk konkrete Kennzahlen zur Messung des Erfolgs von einzelnen Transformationsmaßnahmen. Aus den genannten Gründen wurde eine aktualisierte Version mit der Bezeichnung "Digital Orchestra" entwickelt, die das "Digital Piano" ersetzt.

### 3.4.3 Digital Reinvention Framework

Aspekte für eine erfolgreiche digitale Transformation werden auch von Berman, Korsten und Marshall [142] im Jahr 2016 durch das „Digital Reinvention Framework“ dargelegt. Die Autoren vertreten die Meinung, dass es für eine erfolgreiche digitale Transformation unerlässlich ist, als Unternehmen eine neue strategische Ausrichtung zu verfolgen, neues Fachwissen aufzubauen und neue Arbeitsweisen einzuführen. Für eine erfolgreiche Transformation ist laut der Autoren eine Neuerfindung von Strategie, Betrieb und Technologie von unten nach oben erforderlich. Auf der Grundlage dieser Argumente entstand das Modell, das sich auf die Kombination verschiedener digitaler Technologien wie Cloud Computing, Kognition und Analytik, Mobile, Blockchain, IoT usw. konzentriert. [140, 142]

Das „Digital Reinvention Framework“ schlägt einen Weg zur Erreichung einer digital transformierten Organisation durch einen "Experience-first"-Ansatz vor, der sich auf die Übernahme digitaler Technologien konzentriert und auf einem Fundament aus drei organisatorischen Schlüsselprioritäten aufbaut: Verfolgung eines neuen Fokus, Entwicklung neuer Fachkenntnisse und Einführung neuer Arbeitsweisen. Die größte Einschränkung dieses Modells ist die Tatsache, dass es bisher rein theoretisch und demnach ohne empirische Belege ist. [139, 142]

### 3.4.4 The Digital Innovation Strategy

Die von Nylén & Holmström [143] im Jahr 2015 vorgeschlagene "Strategie für digitale Innovation" konzentriert sich auf drei große Kategorien: "Produkte" – umfasst die Benutzererfahrung und das Wertangebot; "Umfeld" – umfasst die digitale Entwicklung; und schließlich "Organisation" – umfasst die Fähigkeiten und Umsetzung. [139]

Außerdem betont die Strategie für digitale Innovation die Tatsache, dass Organisationen eine ganzheitliche 360-Grad-Sicht auf die digitale Transformation haben müssen, um digitale Innovationen in einer Organisation zu verwalten. [140]

Laut [139] hat dieses Modell den großen Nachteil, dass es sich ausschließlich auf digitale Produkte und Dienstleistungen konzentriert und somit traditionelle Unternehmen außen vor lässt, die zwar in der Lage sind, andere Segmente des Geschäftsbetriebs und der Kundenbeziehung zu digitalisieren, aber durch die Tatsache eingeschränkt sind, dass sie Produkte und Dienstleistungen anbieten, die nicht vollständig digitalisiert oder digital bereitgestellt werden können. Nichtsdestotrotz stellt der Rahmen ein nützliches Instrument dar, das Organisationen, die digitale Produkte und Dienstleistungen anbieten, dabei hilft, zu erkennen, wo sie sich derzeit auf ihrem Weg zu besseren digitalen Produkten und Dienstleistungen sowie zu einer ganzheitlichen digitalen Transformation befinden. [139, 143]

#### 3.4.5 Digital Transformation Framework

Zu dieser Transformationsstrategie haben sich zwei separate Ansätze mit demselben Namen etabliert.

**Matt, Hess, & Benlian (2015) [144]:**

Das Digital Transformation Framework ist ein weiteres Rahmenwerk zur Ableitung einer Strategie zur digitalen Transformation in Organisationen. In diesem Rahmenwerk argumentieren Matt et al. [144], dass es vier wesentliche Dimensionen für eine digitale Strategie gibt, nämlich den Einsatz von Technologien, Veränderungen in der Wertschöpfung, strukturelle Veränderungen und finanzielle Aspekte. In der Studie heißt es weiter, dass der Kern einer jeden digitalen Strategie der finanzielle Aspekt sein sollte, da der strategische Fokus eines jeden Unternehmens in erster Linie auf nachhaltigem Wachstum und langfristigen Gewinnen liegt. [140, 144]

**Corver und Elkhuisen (2014) [145]:**

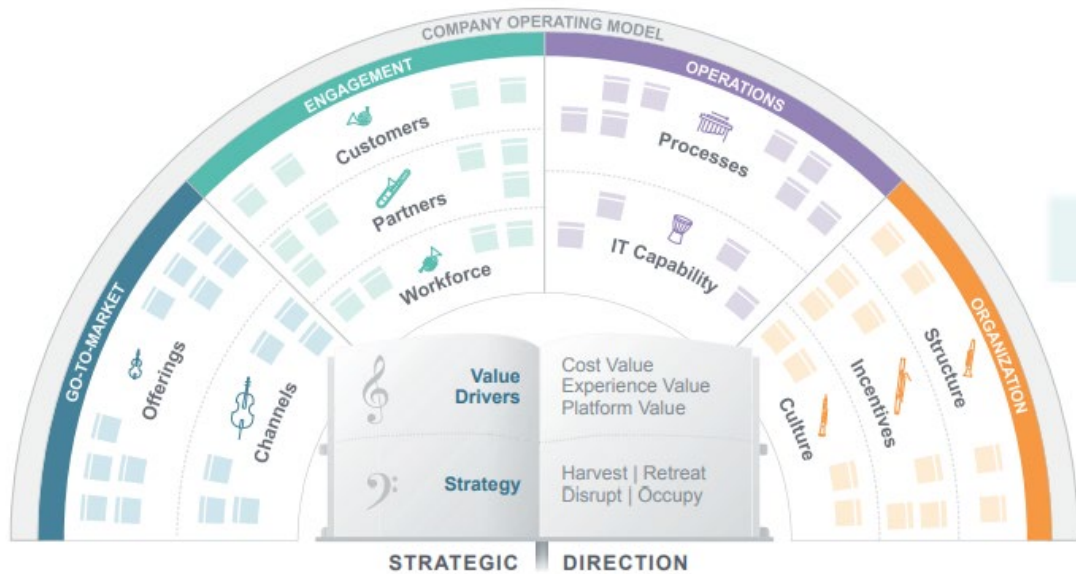
Die von Corver und Elkhuisen [145] vorgeschlagene Strategie für die digitale Unternehmenstransformation basiert ebenfalls auf vier Schlüsselementen: Kunde,

Produkt, Organisation sowie Prozesse und Systeme. Die Autoren argumentieren, dass "die digitale Transformation oft mit dem Kunden beginnt" und dieser als Prämisse für die digitale Transformation betrachtet werden muss [145]. Sie sind daher der Ansicht, dass der Transformationsprozess einer logischen Reihenfolge folgen sollte, die zuerst das bessere Verständnis des Kunden, dann die Verbesserung des Serviceniveaus und die Digitalisierung des Kundenerlebnisses sowie zuletzt die Digitalisierung der Abläufe, Produkte und Dienstleistungen beinhaltet. [140, 145]

Nach [139] lässt sich aus der Überprüfung dieses Rahmens ableiten, dass bei der Entwicklung dieses Rahmens ein Reverse-Engineering-Ansatz angewandt wird, um darzustellen, wie Organisationen erfolgreich zur Digitalisierung ihrer Geschäftsmodelle übergehen können.

#### 3.4.6 Digital Orchestra Framework

Das Digital Orchestra Framework [146] wird als Ersatz bzw. Weiterentwicklung für das „Digitalization Piano“-Framework von [141] vorgeschlagen. Das Modell wurde in einem Bericht des Global Centre for Digital Business Transformation (GCDBM) veröffentlicht. Die Grundlage besteht darin, dass die Führung eines Unternehmens vorgibt, welche Art von Wert sie schaffen möchte und die strategischen Optionen zur Erreichung dieses Ziels festlegt. Dabei beschreiben die Autoren zehn Bereiche in vier Kategorien (vgl. Abbildung 27), die eine Organisation während einer digitalen Transformation berücksichtigen sollte [146].



Source: Global Center for Digital Business Transformation, 2015-2017

Abbildung 27: Digital Orchestra Framework [146]

Der Rahmen deckt besonders die Organisationsstrukturen und -interessen in erheblichem Maße ab, so dass ein wertvolles Instrument für die Koordinierung der digitalen Transformation entstanden ist. Die vier Kategorien, die die zehn Elemente des Rahmens abdecken, müssen für eine erfolgreiche digitale Transformation nahtlos ineinandergreifen. [139]

### 3.4.7 Digital Enterprise Integrative Management Framework

Bowersox et al. [147] beschreiben in ihrem Beitrag das „Digital Enterprise Integrative Management Framework“ aus der Perspektive der Supply Chain Excellence und argumentieren, dass "echte Supply Chain Excellence nur durch digitale Unternehmenstransformation erreicht werden kann". Die Autoren sehen darin eine Transformation, die alle Möglichkeiten neuer Technologien ausschöpft, was wiederum die Zusammenarbeit in der Lieferkette erleichtert und zu neuen Ebenen der operativen Exzellenz führt [147]. Diese Strategie verfolgt den Ansatz, die Transformation in drei Prozesse zu unterteilen: Kernprozesse des Unternehmens – mit Schwerpunkt auf der Maximierung des Kundenwerts; gemeinsam genutzte Echtzeitinformationen und Konnektivität – Ermöglichung eines reaktionsbasierten/nachfragegesteuerten Netzes

von Lieferkettenbeziehungen; und eine Verpflichtung zu betrieblicher Exzellenz – Manifestierung in Form von Kundenorientierung [147]. Der Aspekt der Kernprozesse des Unternehmens ist das Herzstück der Strategie, die die digitale Transformation anhand von fünf Komponenten vorantreibt: integrierte Abläufe, Messung und Kennzahlen, Finanzverwaltung, Kundenbetreuung und Personalentwicklung [147]. Laut [139] leistet dieses Rahmenwerk aus akademischer Sicht gute Arbeit, indem er mit seinen "Sechs F's" für die digitale Transformation von Unternehmen einen "How to"-Ansatz skizziert. Wie bei den meisten anderen bisher untersuchten konzeptionellen Rahmenwerken fehlt es jedoch an Validierungen und Tests, um die Praxistauglichkeit zu belegen.

### 3.5 Bewertung und Vergleich

Im Folgenden werden die in Kapitel 3 beschriebenen Migrationsstrategien und –prozesse, die Strategien zur Prozessoptimierung, organisatorischen Change Prozesse sowie die Transformationsstrategien und –prozesse anhand von Bewertungskriterien verglichen. Die Bewertungskriterien wurden in Kapitel 2.3.4 auf Basis von Erkenntnissen aus der Literatur sowie als Ableitung von den Einflüssen aktueller Entwicklungen auf die Dimensionen Technik, Prozess und Organisation in der Automobilindustrie definiert. Das Ergebnis der vergleichenden Bewertung ist Tabelle 1 zu entnehmen. Die grün hinterlegten Zeilen stellen jeweils die letztlich im Rahmen dieser Arbeit ausgewählten Methoden/Strategien dar.

	Aufwand/Kosten	Vorgehensweise	Daten, Tools und Infrastruktur	Menschen	Umweltbedingungen	Prozess	Eignung für ganzheitliche Betrachtung
<b>Migrationsstrategien</b>							
Big Bang	●		◐				
One Shot	●		◐				
Parallel Systems	◐	◐	●	◐	◐	◐	◐
Phased Introduction	◐	●	●	◐	◐	◐	◐
<b>Migrationsprozesse</b>							
Mash-up		◐	●		◐	●	
SOAMING	●	●	◐	◐	◐	◐	◐
SMART		●	◐	◐	●	◐	◐
Cloudstep	◐	●	◐	◐	●	●	◐
Five-phased Waterfall model	●	●	●	◐	●	●	●
IMCAESOP		◐	◐			◐	
XIRUP	●	●	●	●	◐	●	●
FAR EDGE	●	●	●	●	●	●	●
PERFoRM	◐	●	●	●	●	●	●
<b>Prozessoptimierung</b>							
KVP	◐	●	◐	◐	◐	●	◐
Kaizen	◐	●	◐	●	●	●	●
Six Sigma	◐	●	◐	◐	●	●	◐
Business Reengineering	●	◐	◐	◐	◐	◐	◐
Agile Methoden		●	◐	●	◐	◐	◐
<b>Change</b>							
Lewin		◐		●	◐		
Prosci ADKAR Model		◐	◐	●			
Kotter		◐		●	●	◐	◐
Lippitt's Phases of Change Theory		◐		●	●		
Prochaska and DiClemente's Change Theory		●		●	●		
Social Cognitive Theory		◐	◐	●	●	◐	◐
<b>Transformationsstrategien</b>							
Six Keys to success		◐			◐		
Digitalization Piano		◐	◐	●	◐	●	◐
Digital Reinvention Framework			●	●	●		
The Digital Innovation Strategy			◐	◐	◐	◐	
Digital Transformation Framework	●		●	◐	◐	●	◐
Digital Orchestra Framework		◐	◐	●	●	●	◐
Digital Enterprise Integrative Management Framework	●	◐	◐	◐	●	●	◐

● voll erfüllt ◐ teilweise erfüllt (leer) nicht erfüllt

Tabelle 1: Bewertung und Vergleich der Ansätze zur Transformation

## Migrationsstrategien

Die Bestimmung der optimalen Strategie hängt unter anderem von den unternehmerischen Anforderungen der Organisation, dem internen und externen Umweltkontext sowie den technischen, prozessualen und organisatorischen



Rahmenbedingungen ab. Die verschiedene Strategien können abhängig von dem betrachteten Umfang kombiniert werden [148]. Als Beispiel kann die Implementierung eines neuen Systems mit der Big Bang Strategie genannt werden, wobei alles nach Plan läuft, wenn die neuen Systeme unmittelbar lauffähig sind, sodass die Altsysteme nicht redundant laufen müssen. Für den Fall, dass Probleme auftreten, kann die Strategie der parallelen Systeme als Notfallplan herangezogen werden [24]. Anhand dieses Beispiels begründen [148], dass bei der Transformation eines bestehenden Produktionssystems ein hybrider Ansatz, d.h. eine Kombination verschiedener Strategien, besser geeignet sein kann, um eine reibungslose Migration in einem unsicheren Umfeld zu gewährleisten. Dies ist auch eine Schlussfolgerung aus der vergleichenden Bewertung, da keine Migrationsstrategie existiert, die optimal geeignet ist.

### **Migrationsprozesse**

Das schrittweise, iterative und inkrementelle Vorgehen ist wichtig, um eine reibungslose, aber progressive Migration des Systems zu gewährleisten. Einige der in Kapitel 3.1 betrachteten schrittweisen Migrationsprozesse sind entweder iterativ oder inkrementell. Laut der Analyse von [24] weisen nur SOAMIG, Cloudstep, Five-phased-Waterfall, XIRUP und PERFoRM beide Merkmale auf. Weiterhin ist die Iteration innerhalb des Migrationsprozesses wichtig, um Kontinuität zu gewährleisten und sicherzustellen, dass jede Phase zu einer Verfeinerung der Spezifikation der Migrationslösung führt. Außerdem sollte der Migrationsprozess die Bewertung alternativer Optionen beinhalten, um sicherzustellen, dass die optimale Migrationslösung identifiziert wird. Die genannten Anforderungen werden unter dem Begriff „Vorgehensweise“ zusammengefasst.

Als weitere Anforderung an einen Migrationsprozess wurde in der vorliegenden Arbeit die Betrachtung bestehender sowie neuer IT-Systeme, IT-Infrastruktur und Daten definiert, da diese in modernen Produktionsumgebungen sowie den dazugehörigen Datenmodellen objektorientiert und durchgängig aufgebaut sein sollen. Weiterhin ist von zentraler Bedeutung, dass bei allen Aktivitäten im Migrationsprozess der Mensch im Fokus steht, da in zahlreichen Beiträgen belegt wurde, dass ohne Akzeptanz der

beteiligten Personen die meisten Migrationsvorhaben scheitern. Diese beiden Anforderungen werden in keinem der betrachteten Migrationsprozesse vollständig erfüllt.

Unter Betrachtung aller Anforderungen kann die Eignung des jeweiligen Ansatzes für die Integration in eine ganzheitliche Transformationsstrategie bewertet werden. Diese Bewertung fällt für Five-phased-Waterfall, XIRUP, FAR EDGE und PERFoRM positiv aus, da die Mehrheit der Kriterien ganz oder teilweise erfüllt sind.

### **Prozessoptimierung**

Um eine möglichst langfristig erfolgreiche Prozessoptimierung zu gewährleisten, sollte der Ansatz über Abteilungsgrenzen oder sogar über Unternehmensgrenzen hinwegblicken und die dabei gewonnenen Erkenntnisse bezüglich interner und externer Umweltbedingungen miteinbeziehen. Auch bei Ansätzen zur Prozessoptimierung ist es notwendig, den Menschen im Fokus zu haben. So ist eine kooperative Unternehmenskultur, sowie die Ausrichtung auf die Kunden, eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Arbeitsabläufe und die starke Einbeziehung der beteiligten Mitarbeitenden von zentraler Bedeutung für eine erfolgreiche Prozessoptimierung. Der Erfüllungsgrad dieser Kriterien ist bei Kaizen und bei agilen Methoden am höchsten. Darüber hinaus kann die Erkenntnis festgehalten werden, dass die Schaffung von abteilungsübergreifendem Verständnis für die Durchführung der Optimierungsmaßnahme ein wichtiges Kriterium darstellt. Zudem sollte der Ansatz ein starkes Engagement der Führung beinhalten, um die Verankerung des Prozessdenkens sowie der entsprechenden Verbesserungskultur in der Organisation zu unterstützen.

Ein kleinschrittiges Vorgehen ist auch bei der Prozessoptimierung wichtig, um reibungslosen, aber progressiven Fortschritt zu gewährleisten. Zuletzt darf aber auch der Umsetzungsaufwand nicht unberücksichtigt bleiben, da dieser Faktor bei den betrachteten Ansätzen stark variiert und in der Auswahl eines geeigneten Vorgehens eine wichtige Rolle spielt. Diese Charakteristika sind nur bei Kaizen fast vollständig enthalten.

Unter Betrachtung aller Anforderungen kann die Eignung des jeweiligen Ansatzes für die Integration in eine ganzheitliche Transformationsstrategie bewertet werden. Diese Bewertung fällt nur für Kaizen vollständig positiv aus.

### **Organisatorische Change Prozesse**

Ein Change Prozess, der eine Organisation nachhaltig verändern soll, berücksichtigt laut [81] sowohl externe als auch interne Umweltbedingungen. Zu den externen Umweltbedingungen zählen zum Beispiel die aktuell vorliegende gesellschaftliche Situation oder politische Ereignisse. Interne Bedingungen sind individuelle, in der jeweiligen Organisation vorliegende Voraussetzungen. Eine Berücksichtigung dieser Faktoren findet bei Kotter, Lippitt, Prochaska und DiClemente sowie bei der sozial kognitiven Theorie statt. Weiterhin sollte das Modell bestimmte Voraussetzungen bzgl. der zugrundeliegenden Vorgehensweise erfüllen (z.B. zyklischer Aufbau [81]). Diese Anforderungen werden nur von Prochaska und DiClemente annähernd erfüllt. Zuletzt fordert [81] von allen Ansätzen, dass die sog. Selbstwirksamkeit der beteiligten Personen gefördert wird. Selbstwirksamkeit ist definiert als das Vertrauen in die Fähigkeit, etwas zu tun und dabei zu bleiben. Die Selbstwirksamkeit spielt in der Theorie des geplanten Verhaltens und in der sozial-kognitiven Theorie eine große Rolle und wird bei allen Modellen außer dem von Kotter berücksichtigt. Laut [86] ist ein weiterer wichtiger Faktor das Engagement der höheren Führungsebenen sowie die Vermittlung von Dringlichkeit für den Wandel. Von den untersuchten Modellen erfüllt nur Kotter's Modell diese beiden Anforderungen, welche unter den Sammelbegriff „Mensch“ fallen.

Unter Betrachtung aller Anforderungen kann die Eignung des jeweiligen Ansatzes für die Integration in eine ganzheitliche Transformationsstrategie bewertet werden. Diese Bewertung fällt nur für den Ansatz nach Kotter und die social cognitive Theory annähernd positiv aus.

### **Transformationsstrategien**

Transformationen sind langfristig ausgerichtete Vorhaben, daher ist die Betrachtung der Unternehmensstrategie sowie der digitalen Ausrichtung des Unternehmens laut

[78] ein zentraler Bestandteil von Transformationsstrategien und sollten daher als Bestandteil der internen und externen Umweltbedingungen betrachtet werden. Selbiges gilt für die spezifische Kultur und Werteausprägung im jeweiligen Unternehmen, was auch durch Erkenntnisse aus einem Fallbeispiel belegt werden kann [78, 146]. Diese Kriterien erfüllen nur das Digitalization Piano, Digital Transformation Framework, Digital Orchestra Framework und Digital Enterprise Integrative Management Framework vollständig. Für den Erfolg der (digitalen) Transformation im Unternehmen identifiziert [78] im Kontext des Faktors „Mensch“ die Berücksichtigung und ggf. Einflussnahme auf die Motivation der Mitarbeiter. In Bezug auf die Mitarbeiter ist auch der Knowhow und Kompetenzaufbau ein zentraler Erfolgsfaktor für die digitale Transformation, was durch zahlreiche Studien belegt wird [78, 146, 149], jedoch nur vom Digitalization Piano, Digital Orchestra Framework und Digital Reinvention Framework komplett berücksichtigt wird. Um die Ganzheitlichkeit der Transformation sicherzustellen, ist die Berücksichtigung existierender Prozesse [78, 146] im Unternehmen sowie die Berücksichtigung existierender Infrastruktur (IT) [78] von zentraler Bedeutung. Diese beiden Anforderungen werden vom Digital Transformation Framework komplett erfüllt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sowohl bei der Migration und der Prozessoptimierung als auch bei den Change Prozessen und der Transformation vielversprechende Ansätze existieren, jedoch kein Vorgehen existiert, das als alleiniger Ansatz zu einer ganzheitlichen Transformation verwendet werden kann. Für die Ableitung einer ganzheitlichen Transformationsstrategie, welche die drei Säulen Technik, Prozesse und Organisation ausreichend einbezieht, wird eine Kombination aus Migration, Transformation, Change und Prozessoptimierung vorgeschlagen.

## 4 Grundlagen Engineering Prozesse mit Fokus auf den Anlagenentstehungsprozess

In diesem Kapitel werden die für die vorliegende Arbeit relevanten Grundlagen von Engineeringprozessen im Kontext der Anlagenentwicklung beschrieben. Der Fokus liegt dabei speziell auf die Anlagenentwicklung für Produktionssystemen von Automobilherstellern. In Kapitel 4.1 werden hierfür die Grundlagen aus den

verschiedenen Planungsdisziplinen innerhalb des Anlagenentstehungsprozesses beschrieben. Dabei werden in erster Linie die Planungsdisziplinen aufgegriffen, die auch im gelebten Prozess (vgl. Kapitel 6) eine wichtige Rolle spielen. In Kapitel 4.2 wird der generische Prozess beschrieben, welcher als Verallgemeinerung bzw. Zusammenfassung der in 4.1 beschriebenen Prozessschritte verstanden werden kann. Der generische Prozess aus Kapitel 4.2 kann demnach durch die Prozessschritte aus Kapitel 4.1 umgesetzt werden.

#### 4.1 Darstellung Engineering Prozesse im Allgemeinen

Das Anlagenengineering, der Anlagenentstehungsprozess oder auch die dafür notwendigen planerischen Aspekte werden in der Literatur oft mit der Fabrikplanung oder der digitalen Produktentstehung gleichgesetzt. Dazu hat sich speziell in der Automobil- und der Luftfahrtindustrie das Akronym PEP (Produktentstehungsprozess) etabliert [150]. Pawellek beschreibt den ganzheitlichen Fabrikplanungsprozess als Konglomerat aus Unternehmensplanung und Produktentstehung. Dabei muss das komplexe Zusammenwirken von Produktinformationen, der Technologie, der Organisation, der Mitarbeiter sowie der Finanzen und der Anlagentechnik (siehe Abbildung 28) optimal koordiniert werden. Weiterhin identifiziert Pawellek das Fabrikmanagement, die Kontrolle des Planungserfolges und den kontinuierlichen Verbesserungsprozess als wichtige Aspekte des Betriebs.[151]

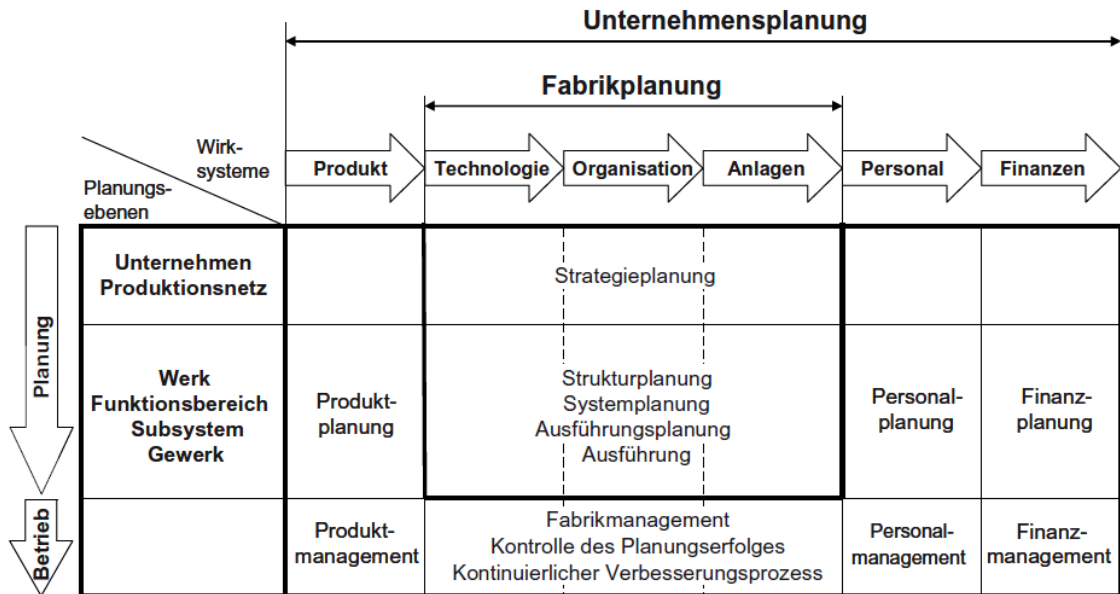


Abbildung 28: Einordnung der Fabrikplanung in die Unternehmensplanung [151]

Im Kontext des Anlagenengineerings sind laut [151] folgende Schritte der Fabrikplanung entscheidend:

**Strukturplanung:** Darunter wird die vollständige, d.h. alle Wirksysteme und Funktionsbereiche umfassende planerische Tätigkeit zur langfristigen Anordnung einer Fabrik verstanden. Die Strukturplanung betrifft demnach alle Produktions- und Logistikprozesse, Teilbereiche und Fachgebiete und stellt damit eine interdisziplinäre Planungsaufgabe dar. In diesem Schritt erfolgt eine Verknüpfung aller Elemente des Fabriksystems mit dem Ziel, ein Optimum aus Funktion, Kosten und sozialen Faktoren zu schaffen. Die Strukturplanung ist sowohl bei Neuplanungen als auch Erweiterungsplanungen, Rationalisierungsplanungen und Sanierungsplanungen anzuwenden. Ein Ergebnis der Strukturplanung sind sog. Prinziplayouts, die die einzelnen Funktionseinheiten in einer Darstellung vereinen. Das abschließende Groblayout enthält alle relevanten Fabrikstrukturen wie Gebäude, Leitungen, Flächen, Wege, Straßen, Quellen, Senken und Produktionselemente der Fabrik. Das Ergebnis dieser aggregierenden Anordnung der sich gegenseitig beeinflussenden Elemente ist die "Struktur einer Fabrik". Des Weiteren werden in der Strukturplanung die einzelnen Fabrikelemente und ihr gegenseitiger Einfluss analysiert und gesamtwirtschaftlich

betrachtet. Die Planung der Fabrikstruktur und damit die Anordnung der Funktionseinheiten erfolgt unter Beachtung der produktionstechnischen, logistischen und organisatorischen Rahmenbedingungen. Unter Funktionseinheiten können folgende Bereiche verstanden werden:

- - Produktion (Fertigung, Montage)
- - Logistik (Materialfluss, Lager, Transport)
- - Hilfsbereiche (Fertigungsmittelbau, Instandhaltung, Versorgung etc.)
- - Verwaltungs- und Personalbereiche

Die wesentlichen Funktionseinheiten sind Produktion und Logistik. Sie bestimmen die Struktur, sind aber abhängig von den zu fertigenden Produkten und den erforderlichen Verfahren und Technologien. Aufgrund der zahlreichen Abhängigkeiten innerhalb der Strukturplanung werden die notwendigen Daten bereits ab Beginn dieser Planungsphase gesammelt und analysiert. Daten, die während der Strukturplanung entstehen oder relevant für diese sind, sind Produktdaten (z. B. Produktionsprogramm, Mengengerüst, Rohstoffliste), Produktionsdaten (z. B. Fertigungsfunktionen, -module, -stufen, Anlagendaten mit Technologien, Kapazitäten und Abmessungen), Materialfluss- und Lagerdaten (z. B. Materialflussbeziehungen zwischen Flächen, Lagerorte, Pufferflächen, Lagerkapazitäten), Daten zur Organisation (z. B. organisatorische Zuordnung der Funktionsbereiche und Personalkapazitäten) sowie Anlagendaten (z. B. Gebäudeinformationen, Geoinformationen, behördliche Auflagen). Aus diesen Daten können Messgrößen und Kennzahlen abgeleitet werden, mit denen wiederum folgende Analysen durchgeführt werden können:

- Produktstrukturanalyse
- Fertigungs- und Montageablaufanalyse
- Materialfluss- und Transportanalyse
- Organisationsanalyse
- Anlagenanalyse
- Personalanalyse
- Kostenstrukturanalyse

**Systemplanung:** In diesem Schritt werden aus den zuvor in der Strukturplanung gewonnenen Erkenntnissen konkrete Projekte abgeleitet. Die Basis dafür bilden die Funktionseinheiten der Strukturplanung, welche in Funktionssysteme (z.B. Lager, Montage, Transport, ...) unterteilt werden. Die Systemplanung wird herstellerneutral und somit ohne konkreten Auftragnehmer für das Engineering der Anlagentechnik durchgeführt. Das Ergebnis der Systemplanung sind detaillierte Systemlösungen und eine Unterteilung in Gewerke. Die in der Strukturplanung erstellten Groblayouts werden um Details bis hin zu einzelnen Anlagenteilen (Förderer, Roboter, ...) oder Logistikelementen (Lagerfächer, ...) angereichert. Die Betrachtungsebenen der Systemplanung umfassen folgende Aspekte (sowohl separat als auch ihre Abhängigkeiten):

- Fertigungs- und Montagesysteme,
- Materialfluss-, Lager- und Transportsysteme,
- Organisations-, Planungs- und Steuerungssysteme,
- Gebäudesysteme und Infrastruktur.

Die verschiedenen Systemplanungsprojekte führen anschließend zu den Ausführungsplanungen, in denen die einzelnen Gewerke detailliert, ausgeschrieben, realisiert und in Betrieb genommen werden.

**Ausführungsplanung:** Die letzte Phase umfasst die Detaillierung der Gewerke, die Ausschreibung dieser sowie die Realisierung bis zur Inbetriebnahme. Innerhalb dieser Phase findet das Detailengineering beim ausgewählten Lieferanten statt. Die Detailplanung, das Ausschreibungsverfahren und die Ausführungsüberwachung stellen in der Ausführungsplanung sicher, dass die zuvor festgelegten Rahmenbedingungen und Abhängigkeiten beim konkreten Engineering berücksichtigt werden. Des Weiteren wird die Ausrüstung und Gestaltung der Arbeitsplätze, die Ver- und Entsorgungseinrichtungen sowie die Gebäudetechnik festgelegt. Damit können die in der Struktur- und Systemplanung erstellten Layouts weiter detailliert und angereichert werden, sodass als Ergebnis die Feinlayouts vorliegen. Diese beinhalten wiederum die Ergebnisse aus den Entwurfsdisziplinen (z. B. Mechanische Planung) und verwenden die dort entstandenen Artefakte weiter [152]. Weiterhin werden die



bisherigen Planungsergebnisse (Personalkapazität, Investitionen und Terminplan) detailliert. Für die Ausschreibung werden in dieser Phase die notwendigen Unterlagen erstellt, deren Kernstück die Spezifikation der Maschinen und Anlagen ist. Anschließend kommt es zur Ausschreibung und Auftragserteilung, welche durch Ausführungsüberwachung und Projektmanagement flankiert werden. Schließlich müssen Aktivitäten zur Personalqualifizierung und weitere personelle Maßnahmen ergriffen werden bis die geplante Fabrik / Anlage in Betrieb genommen werden kann und letztendlich in einen Produktivzustand übergeht.

Ergänzend zur Beschreibung der Fabrikplanung von Pawellek [151] wird im Folgenden die Darstellung des Engineeringprozesses aus Sicht von Weber [153] beleuchtet, welcher dafür insgesamt neun Phasen von der Grundlagenermittlung bis hin zur Inbetriebnahme (siehe Abbildung 29) definiert.

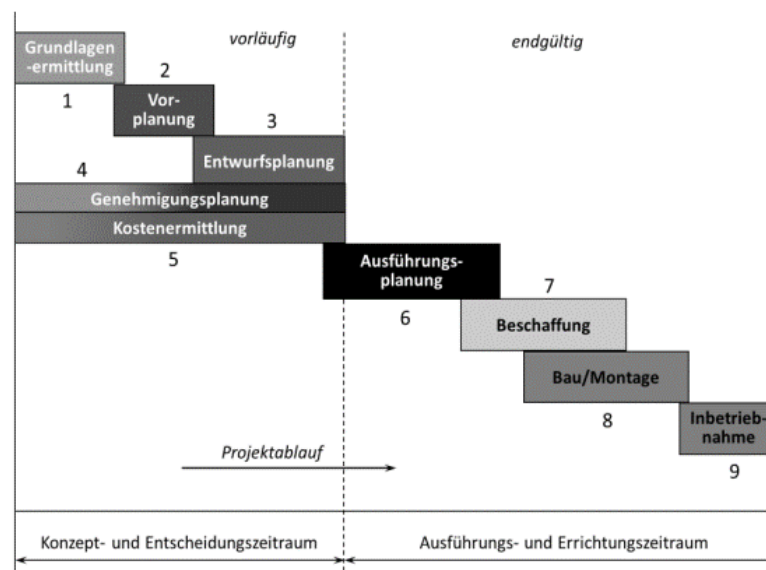


Abbildung 29: Phasenmodell für Planung und Realisierung verfahrenstechnischer Anlagen [153]

Weber unterteilt die neun Phasen in zwei zeitlich definierte Abschnitte, den Konzept- und Entscheidungszeitraum sowie den Ausführungs- und Errichtungszeitraum. Der erste Projektabschnitt ist auch als Vorprojekt bekannt und beinhaltet schwerpunktmäßig die Definition der Aufgabenstellung für das Projekt sowie die Lösungssuche und prinzipielle Lösungsfindung. Die Phasen in diesem Projektabschnitt sind Grundlagenermittlung, Vorplanung, Entwurfsplanung,

Genehmigungsplanung sowie die Kostenermittlung. In der ersten Phase, der Grundlagenermittlung werden ganzheitlich die Anforderungen des Auftraggebers erarbeitet und in Form des Lastenhefts dokumentiert. In diesem Lastenheft sind neben den fachlichen und technischen Anforderungen an das Produkt auch die Rahmenbedingungen (z. B. Bereitstellung der Roh-/Hilfsstoffe, Sicherheits-/Gesundheitsaspekte, etc.) sowie die standortseitigen Voraussetzungen (Infrastruktur, Klima, Umweltaspekte, Ver-/Entsorgungssicherheit, Werkstätten, Labore, Rechtssituation, etc.) zu definieren. In der zweiten Phase, der Vorplanung, werden anhand des Lastenhefts Lösungsalternativen für Prozesse, Mechanik und Technik der zu entwickelnden Anlage erarbeitet, begründet und dokumentiert. In der darauffolgenden dritten Phase (Entwurfsplanung) entsteht ein verbindlicher Entwurf der Anlage. Diese Phase stellt somit die Hauptphase des Basic Engineering dar und wird in vielen Fällen auch von einem Lieferanten durchgeführt. Häufig werden Phase 3 und Phase 6 (Detail Engineering) gemeinsam vergeben. Die Planungstiefe am Ende dieser Phase muss ausreichend detailliert sein, um die Investitionsentscheidung und die Genehmigungsplanung durchzuführen. Diese drei Phasen (Entwurfsplanung, Genehmigungsplanung und Kostenermittlung) überlappen sich, d. h. die phasenspezifischen Arbeiten finden zum Teil parallel statt. In der Genehmigungsplanung (Phase vier) werden alle relevanten Informationen, Daten und Rahmenbedingungen, die zur Genehmigung notwendig sind, erstellt, gesammelt und in Dokumenten zusammengefasst. Die Kostenermittlung (Phase fünf) umfasst die Kalkulation der Investitionskosten, die Ermittlung der Betriebskosten und die Erbringung des Wirtschaftlichkeitsnachweises. Das Detail Engineering in Phase sechs liefert ausführungsfähige Informationen (Dokumente) für die Beschaffung und Errichtung der Anlage sowie für die Inbetriebnahme und den Dauerbetrieb. In der anschließenden siebten Phase erfolgt die Beschaffung, welche die Vorbereitung und Realisierung von Bestellungen, die zur Anlagenrealisierung und ggf. zur Inbetriebnahme benötigt werden, umfasst. Die Phase „Bau und Montage“ (Phase acht) beschreibt die Baustellenabwicklung von Eröffnung der Baustelle bis hin zur Abnahme und umfasst demnach alle Arbeiten, die zur physischen Errichtung der Anlage anfallen. Diese Arbeiten können in die Schritte Baustelleneinrichtung, Bau (Hoch-, Tief- und Stahlbau), Montage, Prüfungen (Sicherheit, Funktion, Abnahme) und

Protokollierung unterteilt werden. Besonders wichtig ist dabei die umfassende Protokollierung, da diese Dokumentation sowohl als Vorbereitung für die Inbetriebnahme als auch als Grundlage für die spätere Instandhaltung dienen. In der letzten Projektphase, der Inbetriebnahme (Phase neun) werden alle Schritte abgedeckt, die bis zum Erreichen eines Dauerbetriebszustandes der Anlage erfolgen müssen. Dabei wird zuerst die Betriebsbereitschaft hergestellt und anschließend anhand von Probefahrten und Performance Tests der Leistungsnachweis erbracht. Die finale Anlage sowie die Tätigkeiten der Inbetriebnahme und deren Ergebnisse werden als sog. AS BUILT-Dokumentation festgehalten

Die Beschreibung des Anlagenengineerings nach Pawellek [151] und Weber [153] decken sich auch größtenteils mit der Definition aus der VDI-Richtlinie 3695, welche in mehreren Blättern das Engineering von Anlagen beschreibt. Das Vorgehensmodell für Projektträger wird in vier Phasen unterteilt [10]:

- Akquisition: im Unterschied zu der Vergabetätigkeit in den Planenden Organisationen liegt hier die Angebotserstellung und Auftragsannahme aus Sicht eines Lieferanten im Fokus
- Planung: Planungsschritte vom Groben zum Feinen
- Realisierung: Detailed Engineering der Produktionsanlage inkl. aller Dokumentation
- Inbetriebnahme: Inbetriebnahme der Produktionsanlage inkl. Übergabe an den Auftraggeber

Die einzelnen Planungsschritte gemäß [153] sind vergleichbar mit denen nach [151] und auch die grobe Beschreibung aus Sicht von Projektträgern (Auftragnehmern) wie in der VDI-Richtlinie 3695 [10] beschrieben, zeigt keine signifikanten Unterschiede auf. Zusammenfassend besteht die Planungsaktivität immer aus mehreren Phasen oder Schritten, die sich vom Groben Entwurf bis zu einer detaillierten Beschreibung von einzelnen Gewerken ziehen. Danach schließt in allen Fällen eine Ausschreibung mit Vergabe sowie die Überwachung des Anlagenengineerings an. Die Inbetriebnahme oder deren Überwachung schließen den Planungsprozess ab.



Darstellung aller Verbindungselemente. Die Mechanische Konstruktion enthält somit bewegte Teile inkl. deren Aktoren.

Die Elektrik und Elektronik stellt elektrische Verbindungen und die elektrische Verarbeitung von Signalen dar [154]. Mit Hilfe von E-CAD Werkzeugen können aus einzelnen elektrischen Komponenten gesamte Systeme erstellt werden. Das Ergebnis sind in der Regel Verdrahtungspläne sowie die dazugehörigen elektrischen Stücklisten. Eine zentrale Steuereinheit übernimmt die Auswertung von Inputs (z.B. Signale eines Sensors) sowie die Ansteuerung der Outputs (z.B. Freigaben oder Geschwindigkeiten von Motoren). Zu den einzelnen Disziplinen sind entsprechende Simulationen vorhanden. Dabei können der Materialfluss, Kollisionen und Erreichbarkeiten sowie die Funktion der Software abgesichert werden. [154]

Abbildung 31 stellt zusammenfassend die wesentlichen Disziplinen der Anlagenplanung und des Detailed Engineering und allen weiteren vorhergehenden Disziplinen dar. Dabei handelt es sich um fünf Planungs- bzw. Engineeringschritte, die durch drei Simulationsarten flankiert werden. Bekannte Artefakte der Planung oder des Engineerings werden in Form von Bibliotheken beigesteuert. Die Basis hierfür bilden entsprechende Standardisierungstätigkeiten der jeweiligen Unternehmen.

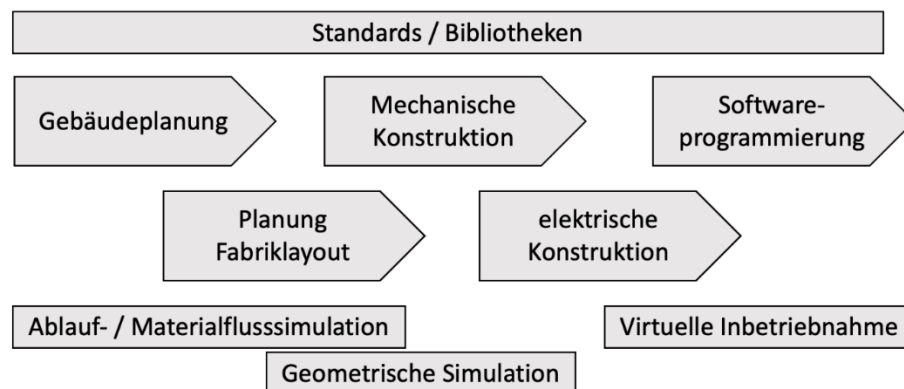


Abbildung 31: Engineeringprozess von Produktionsanlagen (vereinfacht)

Dabei generieren die fünf Planungs- und Engineeringschritte neue Informationen aus Sicht der Anlagenkonstruktion. Die Simulationen konsumieren die meisten Informationen und dienen als Prüfung für die Qualität der Planungs- und Engineeringschritte sowie als Grundlage für Optimierungen.

Im folgenden Abschnitt werden die einzelnen Disziplinen bezüglich deren Inhalt grob beschrieben.

#### 4.1.1 Planung Fabriklayout

Im Rahmen der Layoutplanung wird auf Basis des bisher geplanten Produktionsprozesses, der benötigten Kapazitäten, der angestrebten Segmentierung und der bekannten Rahmenbedingungen ein oder mehrere Layouts entworfen. Allgemein wird in der Layoutplanung das Ziel verfolgt, ein Layout der Fabrik nach bestimmten Gestaltungskriterien zu definieren, wodurch die zukünftige Produktion so verschwendungsfrei wie möglich ausgeführt werden kann. [155]

Die Grundlage der Layoutplanung bilden sieben Prinzipien, welche in Abbildung 32 dargestellt werden und sicherstellen sollen, dass zur Diskussion stehende Planungsalternativen in einem Layout optimal abgebildet werden.

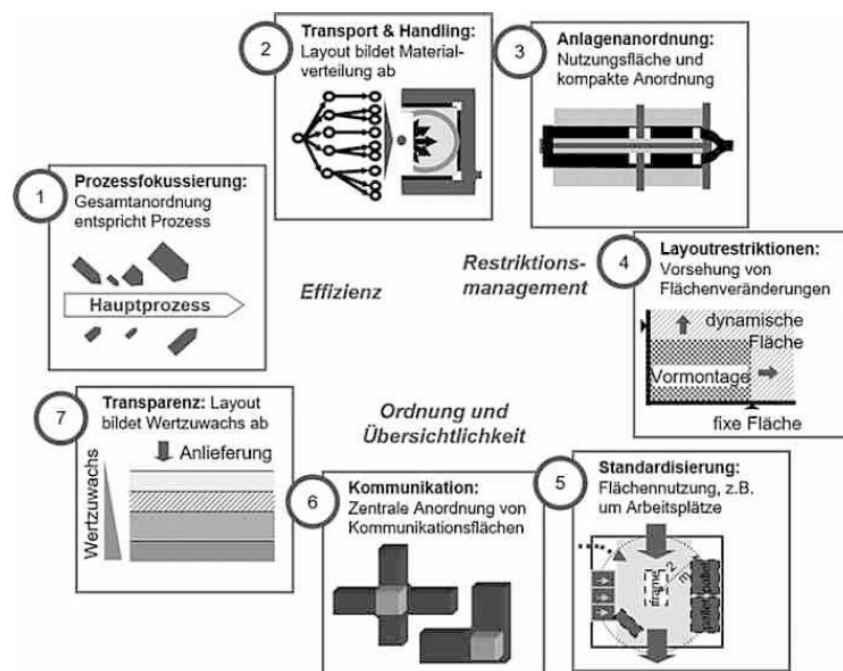


Abbildung 32: Gestaltungsprinzipien Layoutplanung [155]

Einige der Prinzipien verhalten sich komplementär zueinander (z. B. die Prozessfokussierung und die Realisierung eines transparenten Layouts), während andere Prinzipien konkurrierend wirken (bspw. eine kompakte Anlagenanordnung

gegenüber dem Einplanen dynamischer Flächen in Anbetracht sich ergebender Layoutrestriktionen). Nichtsdestotrotz tragen die sieben vorgestellten Gestaltungsprinzipien dazu bei, ein „Lean Layout“ zu erreichen, welches in Summe möglichst verschwendungsfreie Prozesse ermöglichen soll. Speziell bei der sog. Brownfield Planung (Umplanung bestehender Strukturen) steht die effiziente Anordnung der Betriebsmittel innerhalb der vorgegebenen baulichen Strukturen im Vordergrund. Das Optimum wird erreicht, wenn ein kompaktes Layout mit optimalen Kosten, maximaler Nutzbarkeit, maximaler Flexibilität und aufwandsarmer zukünftiger Wandelbarkeit geschaffen wurde. [155]

Weiterhin kann die Layoutplanung in vier Teilbereiche gegliedert werden. Dies sind: Materialflussplanung und Betriebsmittelanordnung, Flächenbedarfsplanung, Groblayoutplanung sowie Feinlayoutplanung.

Der Materialfluss spielt eine zentrale Rolle in der Layoutplanung und verfolgt folgende zwei Kernziele [156]:

- Sicherung eines möglichst einheitlichen und richtungsorientierten Materialflusses (Vorwärtslauf und Wertzuwachs).
- Distanzminimale räumliche Anordnung von schnittstellenreichen Funktionseinheiten.

In der **Flächenbedarfsplanung** wird der benötigte Flächenbedarf für die jeweilige Produktionsstätte bestimmt. Der genaue Flächenbedarf kann genutzt werden, um die notwendigen Investitionen über einen Kostensatz pro Quadratmeter annähernd genau zu berechnen.

Die eigentliche Layoutplanung beginnt auf oberster Ebene mit dem Werksstrukturlayout, wobei das Layout der Fabrik in den vorhandenen Grundstücksgrenzen festgelegt wird. Parallel dazu werden die Layouts für die Produktion und die administrativen Bereiche geplant. Das gesamte Vorgehen zur Erstellung des Layouts der eigentlichen Fabrik kann grundsätzlich in die Groblayoutplanung und die sich daran anschließende Feinlayoutplanung gegliedert werden. In der **Groblayoutplanung** werden die abgeschätzten Flächenbedarfe mit den

vorhandenen Informationen auf Basis der bisher gewonnenen Erkenntnisse detailliert. Die zuvor bestimmten Flächenbedarfe werden anhand des optimalen Materialflusses angeordnet, sodass nach der Groblayoutplanung ein sog. Blocklayout erstellt werden kann. In der darauffolgenden **Feinlayoutplanung** werden vor allem die Arbeitsplätze detailliert, wobei insbesondere Fragen der individuellen Arbeitsumgebung und der Arbeitsplatzgestaltung beleuchtet werden.

Abschließend werden die entwickelten Entwürfe für Werks-, Grob- und Feinlayout mit zuvor definierten Bewertungskriterien beurteilt und verglichen und zusätzlich einer Risikobetrachtung unterzogen. [155]

#### 4.1.2 Gebäudeplanung

Vor der konkreten Gebäudeplanung wird das Gebäude nur als das Objekt betrachtet, das Nutz- und Arbeitsflächen beinhaltet und die Hüllfunktion innehat. Die Gebäudeplanung kann aber durch eine gezielte Gestaltung wesentliche Bereiche der Produktion positiv sowie negativ beeinflussen. Sowohl eine flexible und wandlungsfähige Raumstruktur als auch durchdachte Arbeitsplätze und eine schnittstellenfähige Architektur können die Produktivität eines produzierenden Unternehmens erhöhen [157, 158]. Viele dieser Gebäudeeigenschaften müssen bereits in frühen Planungsphasen definiert werden, da eine spätere Änderung nur schwer realisierbar ist.

Die Basis für die Gebäudeplanung bilden die bisherigen Planungsergebnisse aus der Layoutplanung. Notwendige Informationen sind das Produktionslayout, die Flächengliederung (Flächengrößen und -anordnungen), die erforderliche Raumhöhe, die Tragfähigkeit des Bodens, die Versorgungs- und Entsorgungsnetze sowie weitere Anforderungen an die Baukonstruktion. Für die Entwicklung von Gebäudekonzepten müssen die Gebäudetypologie und Gebäudegrundformen, die Gebäudekonstruktion, die Gebäudetechnik und Medien sowie der Brandschutz. Die Gebäudeplanung umfasst somit verschiedene Disziplinen und setzt die Einbindung erfahrener Fachplaner voraus.



Für die Wirtschaftlichkeit eines Gebäudes über den gesamten Lebenszyklus hinweg sind weitere Faktoren relevant, die sowohl die Effizienz der Wertschöpfungskette steigern als auch die langfristige Entwicklung von Gebäuden nachhaltig optimieren können. Diese Faktoren werden unterteilt in harte und weiche Faktoren und werden im Folgenden beschrieben.

Zu den harten Faktoren zählen Logistik sowie Flexibilität und Variabilität. Zu den weichen Faktoren gehören Arbeitsplatzqualität, die Kommunikation und die Unternehmenswerte, welche überwiegend mit dem „Produktionsfaktor Mensch“ in Verbindung gebracht werden. [159]

Eine weitere Disziplin der Gebäudeplanung ist die Technische Gebäudeausrüstung (TGA). Das Ziel der TGA in Fabrikgebäuden ist die Sicherstellung der erforderlichen Produktionsbedingungen. Zu diesem Zweck muss ein passendes Raumklima geschaffen werden, Qualitätskriterien hinsichtlich der Lufttemperatur erfüllt werden und die Schadstoffkonzentration in der Luft minimiert werden. Diese Faktoren sind neben den Mitarbeitern auch relevant für die optimale Gestaltung der Produktionsprozesse. Daneben sind die Anforderungen an den Brandschutz von den gebäudetechnischen Einrichtungen zu erfüllen. Die Anforderungen, die sich aus all dem an den Bau, die zu verwendenden Materialien, die Lüftung oder an mögliche Feuerlöschvorrichtungen ergeben, müssen durch das gebäudetechnische Konzept abgedeckt werden. [159]

#### 4.1.3 Mechanische Konstruktion

In der Mechanische Konstruktion werden die Elemente, wie sie im Fabriklayout dargestellt sind, im Detail auskonstruiert. Gemäß [160] ist das Ergebnis des Konstruktionsprozess eine eindeutige geometrische Beschreibung des Elements inkl. aller Informationen zu Materialien und Fertigungsverfahren in Form von 2D Zeichnungssätzen (zur Fertigung) und 3D CAD Modellen. Weitere Elemente, die wegen dem geringen Detaillierungsgrad in der Layoutplanung noch nicht generiert wurden, werden in Form von mechanischen Stücklisten bereitgestellt. Die Konstruktionsdaten von Einzelkomponenten, die bereits mehrfach verwendet wurden oder von Herstellern

der Komponenten bereitgestellt werden, können in Form einer Bibliothek abgelegt und verwendet werden.

Die flankierende geometrische Simulation fokussiert sich auf die Überprüfung von Kollisionen und Erreichbarkeiten auf Basis der vorhergehenden mechanischen Konstruktion. Unter Hinzunahme von Roboterprogrammen können auch deren Bewegungsfähigkeiten und Taktzeiten simuliert und analysiert werden [161]. Um aus der statischen Konstruktion ein bewegtes Modell zu entwickeln, muss für jede Bewegungsachse ein entsprechendes Koordinatensystem sowie deren Abhängigkeit voneinander angelegt werden (Kinematisierung) [161]. Somit ist diese Simulation kein reiner Datenkonsument, sondern generiert für die bestehenden Konstruktionselemente die notwendigen Kinematik Informationen.

#### 4.1.4 Elektrische Konstruktion

Während der elektrischen Konstruktion liegt der Fokus auf allen elektrischen Komponenten und Verbindungen. Gemäß [162] entstehen somit Verdrahtungspläne mit allen elektrischen Bauteilen, Steck und Kabelverbindungen sowie den entsprechenden Stücklisten aller Kabel und Bauteile. Die Elektrokonstruktion stellt laut [162] auch die Topologie des Feldbus (z.B. Profinet) sowie den entsprechenden Adressraum der Ein- und Ausgänge der Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) dar. Man spricht in diesem Fall von der „Hardwarekonfiguration“. Die Elemente erhalten elektrokonstruktionsspezifische Namen oder Bezeichnungen innerhalb einer spezifischen Hierarchie. Die Vorlagen von Einzelkomponenten, die bereits mehrfach verwendet wurden oder von Herstellern der Komponenten bereitgestellt werden, können in Form einer Bibliothek abgelegt und verwendet werden. Gemäß [162] spricht man hierbei von „Makros“.

#### 4.1.5 Softwareprogrammierung

Die Softwareprogrammierung definiert den größten Teil der Funktion des automatisierten Systems. Über entsprechende Programmiersprachen werden logische Funktionen realisiert, die auf Basis verschiedener Eingangssignale entsprechende Ausgangssignale setzen [163]. Dabei kann es sich sowohl um direkte Ein- und

Ausgänge auf der Steuerung selbst, Ein- und Ausgänge auf Feldebene oder auch die Kommunikation zu MES-Systemen handeln. Die Kommunikation über OPC UA fällt ebenfalls unter diese Kategorien. Die Bustopologie und die Adressbereiche der entsprechenden Geräte wird in der „Hardwarekonfiguration“ festgelegt. Diese steht in direkter Verbindung zur „Hardwarekonfiguration“ der elektrischen Konstruktion. Eine SPS spezifische Erweiterung dieser „Hardwarekonfiguration“ sind die Gerätebeschreibungen. Diese enthalten alle notwendigen Informationen zur Konfiguration des entsprechenden Geräts sowie alle Kommunikationsparameter. Die Ergebnisse der Softwareprogrammierung sind gemäß [163] eine Hardwarekonfiguration mit der genauen Bezeichnung von allen Ein- und Ausgängen und Kommunikationsprotokollen sowie die entsprechende Steuerungslogik. Außerdem findet in dieser Phase die Konfiguration der HMIs (Human Machine Interface). Anhand dieser Bildschirme oder Dashboards können Benutzer mit Maschinen, Computerprogrammen oder Systemen kommunizieren. HMIs zeigen z. B. Echtzeitdaten an und ermöglichen dem Benutzer, Maschinen über eine grafische Benutzeroberfläche zu steuern [164].

Die Virtuelle Inbetriebnahme befindet sich am Ende der Engineeringkette. Das Ergebnis der virtuellen Inbetriebnahme ist eine Aussage über die Funktionstüchtigkeit bzw. die Fehlerfreiheit der entsprechenden Steuerungslogik. Die Details sind in Wissenschaft und Industrie hinlänglich bekannt und werden an dieser Stelle nicht weiter beschrieben. Die virtuelle Inbetriebnahme ist dabei der Hauptkonsument aller bisher anfallenden Informationen aus dem Engineeringprozess. Laut [165], [166] und [167] werden folgende Informationen für den entsprechenden Zweck konsumiert:

- Fabriklayout und mechanische Konstruktion inkl. Kinematik für die Modellierung der entsprechenden funktionalen 3D Umgebung
- Hardwarekonfiguration aus der elektrischen Konstruktion bzw. der Softwareprogrammierung zur Konfiguration der Treiberbindung vom virtuellen Modell zum Steuerungssystem
- Ein- und Ausgangsbeschreibung zur Verknüpfung mit entsprechenden Verhaltensmodellen

Alle diese Informationen müssen hierfür einer eindeutigen Bezeichnungssystematik sowie einer entsprechenden Hierarchie folgen.

## 4.2 Erläuterung des generischen Anlagenentstehungsprozesses

Aufgrund der Vielzahl von existierenden Vorschlägen zur Darstellung von Anlagenentstehungsprozessen wird im Folgenden die für die vorliegende Arbeit relevante Aggregation generischer Anlagenentstehungsprozesse aus der Literatur nach [168] erläutert. Die Autoren legen den Fokus auf das mechatronische Engineering, die Ergebnisse können jedoch so weit abstrahiert werden, dass diese auch für den allgemeinen Anlagenentstehungsprozess herangezogen werden können. Für eine Clusterung der entwickelten Prozesse ziehen die Autoren die jeweiligen Geschäftsmodelle heran, die sich aus dem Kontext des Engineeringprozesses ergeben. Es ergaben sich dabei die Modelle des Lösungsgeschäfts, des Komponentengeschäfts, des Produktgeschäfts und eine Kombination der drei Geschäftsmodelle. [168–170]

Die Autoren weisen darauf hin, dass die Palette der betrachteten Verfahren und Prozesse nicht vollständig ist, was auch für die vorliegende Arbeit gilt. Es werden nur Verfahren vorgestellt, die von der Industrie standardisiert oder im Rahmen führender internationaler und nationaler industrietriebener Entwicklungsprojekte entwickelt wurden. Die als Basis für die Aggregation betrachteten generischen Engineeringprozesse können in [168] nachgelesen werden.

Die Autoren von [168] leiten anhand der in ihrem Beitrag beschriebenen Engineeringprozesse, die sich jeweils einem bestimmten Geschäftsmodell zuordnen lassen, einen generischen Anlagenentstehungsprozess mit dem Fokus auf das mechatronische Engineering ab. Dieser Prozess orientiert sich überwiegend an den Prozessen aus der VDI-Richtlinie 3695 [10] und der VDI-Richtlinie 4499 [171] sowie dem V-Modell aus der VDI-Richtlinie 2206 [172]. Der generalisierte Prozess besteht aus drei Sub-Prozessen abgeleitet von den identifizierten Geschäftsmodellen: Produktgeschäft, Komponentengeschäft und Lösungsgeschäft. [168]

Der Subprozess Produktgeschäft besteht aus fünf Phasen und beginnt mit der Analyse Phase (Analyse von best practice Produktionssystemen, Analyse bzgl. Implementierung und Nutzung, Marktanalyse, Analyse von Technologien). In dieser ersten Phase werden die Basis Anforderungen für die folgenden Phasen definiert. In der zweiten Phase, dem Produkt Design erfolgt die Grob- und Strukturplanung, anschließend im funktionalen Engineering die Detailplanung und schließlich in der Realisierungsphase die konkrete Umsetzung. In der letzten Phase wird die Umsetzung der zuvor definierten Anforderungen validiert. Die Autoren betonen, dass der Prozess bei Bedarf auch zyklisch ausgelegt werden kann, wenn mehrere Schleifen benötigt werden. Das Ergebnis des ersten Subprozesses ist ein Set von funktionierenden Einheiten der Anlage sowie alle zugehörigen Engineering Artefakte. [168]

Der zweite Subprozess (Komponentengeschäft) besteht ebenfalls aus fünf Phasen und beginnt auch mit einer Analyse, wobei die verfügbaren Teile und Funktionalitäten, der Knowhow Bedarf und die Anforderungen aus dem Produktgeschäft analysiert werden. Anschließend in der Phase des Komponenten Designs erfolgt eine hierarchische und strukturelle Planung der Komponenten und ihrer Funktionalitäten. In der dritten Phase, dem funktionalen Engineering wird das Detail Engineering der einzelnen Disziplinen umgesetzt. Nachfolgend in Phase 4 (Realisierung) folgt die Implementierung und der physische Aufbau. Auch dieser Subprozess schließt mit der Validierung der Anforderungen ab und erwartet als Ergebnis ein funktionierendes Set von Komponenten sowie die Engineering Artefakte. [168]

Im dritten Subprozess wird das Produktionssystemdesign betrachtet. Dieses besteht aus sechs Phasen und beginnt mit der Anforderungssammlung, wobei alle produktbezogenen Anforderungen und weitere Anforderungen an das Produktionssystem zusammengetragen werden. Anschließend erfolgt im Fabrikdesign (Phase 2) die Sequenzierung der Anlagen und im funktionalen Engineering das Engineering des kompletten Produktionssystems durch alle beteiligten Disziplinen. Darauf folgt die Installation, die Inbetriebnahme und Validierung sowie zuletzt die Nutzung. [168]

Der gesamte Prozess ist in Abbildung 33 dargestellt.

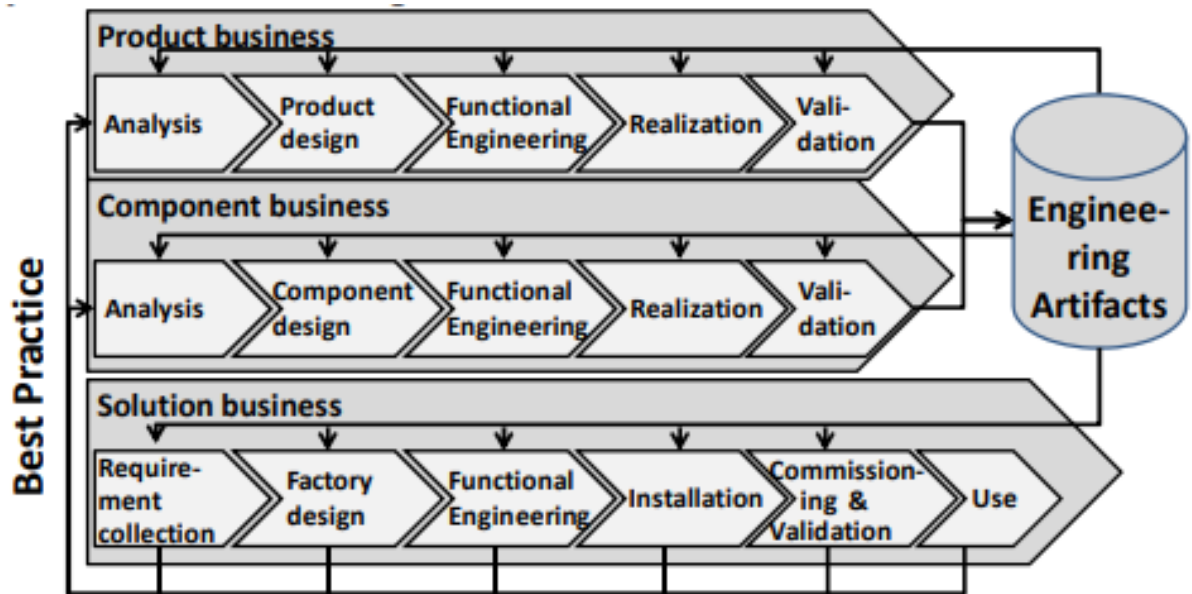


Abbildung 33: Aggregation Engineeringprozesse nach [168]

Für die vorliegende Arbeit wieder dieser generische optimale Prozess zur Anlagenentstehung als Zielbild verwendet und als Grundlage zur Entwicklung des SOLL-Prozesses in Kapitel 7 herangezogen.

### 4.3 Durchgängiges und digitales Engineering

Bereits in vorangegangenen Kapiteln wurde der Begriff „Durchgängigkeit“ oder „durchgängiges Engineering“ immer wieder verwendet, wenn es um das Zielbild des Anlagenentstehungsprozesses geht. In diesem Kapitel wird erläutert, was Durchgängigkeit im Engineering bedeutet, warum es wichtig ist und worin die Notwendigkeit dafür begründet ist.

Besonders bei dem Engineering von komplexen Produktionssystemen ist der Bedarf nach mehr Flexibilität und Adaptierbarkeit zu beobachten. Dieser Bedarf wirkt sich auf den Anlagenentstehungsprozess in Form von häufigeren Entwurfsänderungen, Verkürzung des Gesamtprozesses sowie Erhöhung der Qualitätsanforderungen aus. Diese Optimierungen des Engineeringprozesses werden jedoch oft durch dessen heterogenen und kooperativen Charakter behindert [173]. Die Heterogenität spielt aktuell eine große Rolle, da am Anlagenentstehungsprozess diverse Interessensvertreter beteiligt sind, die sich über die Grenzen von mehreren

Organisationen hinweg verteilen (z. B. Auftraggeber des Produktionssystems, Hauptauftragnehmer, ggf. mehrere Unterauftragnehmer und mehrere Zulieferer von Komponenten). Die genannten Projektteilnehmer arbeiten in den unterschiedlichen Engineering-Disziplinen, etwa mechanisches, elektrotechnisches und Softwareengineering, und nutzen dabei vielfältige (Engineering-) Werkzeuge, Fachsprachen und Informationsmodelle. Diese Situation ist nach Feldmann et al. [174] problematisch, da sie heterogene und semantisch überdeckende Modelle als Schlüsseleigenschaft und Herausforderung in Engineeringprozessen identifiziert haben. Die große Herausforderung liegt demnach darin, dass die Projektteilnehmer trotz Ihrer Heterogenität kollaborieren müssen, um ein komplexes Produktionssystem zu planen. [175, 176]

Verdeutlicht wird die Problematik der fehlenden Durchgängigkeit auch anhand des bewusst pointierten Begriffs „Engineering-Polynesien“ von [177]. Der Austausch zwischen den Dateninseln der Projektteilnehmer oder der Engineering-Disziplinen und -Werkzeuge ist aufwendig, manuell und stellt somit geradezu das Gegenteil von Integration und Durchgängigkeit dar. [178]

Die Lösung dieser Problematik und somit auch der Befähiger für viele (digitale) Optimierungen im Anlagenentstehungsprozess ist das durchgängige, digitale Engineering. Nach [9] lautet die Definition von durchgängigem Engineering folgendermaßen:

*„Durchgängiges Engineering ist abstrakt betrachtet dadurch charakterisiert, dass das Erzeugnis eines Engineering-Arbeitsschritts als Intangible Asset in einer Wertschöpfungskette möglichst verlustfrei und mit möglichst wenig Aufwand weiterverwendbar ist und möglichst keine redundanten Arbeitsschritte für diese weitere Verwendung notwendig sind.“*

Diese Definition legt den Schluss nahe, dass die Durchgängigkeit im Engineering kein absolutes, sondern ein graduell erfüllbares Kriterium darstellt und dass zur Erreichung der Durchgängigkeit folgende Voraussetzungen erfüllt sein müssen: Vorliegen eines standardisierten Datenmodells, Unterstützung durch Toolketten und

übergreifende Kollaborationsfähigkeit im Rahmen des Anlagenentstehungsprozesses [9]. Die in [179] beschriebenen Zielzustände folgender Aspekte des durchgängigen, digitalen Engineerings werden in Kapitel 4.5.1 ausführlich beschrieben:

- übergreifend genutztes Informationsmodell
- Erstellung und Nutzung von Werkzeugketten
- Verwendung einer einheitlichen Syntax und Semantik
- gemeinsames Vorgehensmodell

Auch [180] beschreibt eine Zielsetzung für integriertes und durchgängiges Engineering anhand von drei Kriterien:

- Verwendung von Toolketten entlang aller Gewerke in der Planungs- und in der Betriebsphase.
- Einmalige Eingabe von Daten und zentrale Pflege dieser Daten
- Datenkonsistenz über die Toolketten während des gesamten Anlagen-Lebenszyklus [178]

Diese beiden inhaltlich ähnlichen Definitionen können jedoch noch um einen organisatorischen Aspekt ergänzt werden. Die Grenzen der Datendurchgängigkeit existieren nämlich auch zwischen den Fachdisziplinen der verschiedenen Engineering Prozesse und zwischen den beteiligten Gewerken. Der Grund dafür liegt in den seit mehr als hundert Jahren gewachsenen Strukturen, die auf die Spezialisierung der einzelnen Abteilungen und die Optimierung ihrer Arbeit ausgerichtet sind. Für Durchgängigkeit im Anlagenentstehungsprozess wird die Zusammenarbeit zwischen den Fachdisziplinen aber entscheidend für den Erfolg der Anlagenprojekte sein. Für diese Zusammenarbeit können die aktuellen Trends und Entwicklungen genutzt werden, denn die Digitalisierung, Standardisierung und Durchgängigkeit aller Prozesse und Daten sowie das Arbeiten auf Basis digitaler Modelle ermöglicht ortsunabhängige Kollaboration.[181, 182]

Die durch durchgängiges, digitales Engineering erreichbaren Verbesserungen lassen sich laut [72] in drei Bereiche einteilen: Erhöhung der Produktivität der Arbeit einzelner Ingenieure, Verbesserung der Zusammenarbeit innerhalb und zwischen



Fachbereichen und Herstellung eines fachbereichsübergreifenden Verständnisses der geplanten bzw. laufenden Anlage und des Engineering-Prozesses, in dem sie entsteht oder weiterentwickelt wird.

#### 4.4 Engineeringdatenlogistik

Der Begriff Engineeringdatenlogistik ist eine Erweiterung der allgemeinen Informationslogistik, wobei die Ideen der Logistik auf die Weitergabe von Informationen angewendet werden. Dabei sind dieselben Prinzipien zu beachten, die auch in der klassischen Logistiklehre zu finden sind. Demnach müssen in der Informationslogistik die richtigen Daten zum richtigen Zeitpunkt in der richtigen Qualität zu den richtigen Kosten und am richtigen Ort vorliegen. Nur so können auf Basis von Daten Entwurfsentscheidungen getroffen und der Prozess optimiert werden. Informationslogistik beschreibt also den Datenfluss in einem Netzwerk aus zu treffenden Entwurfsentscheidungen. [183]

Abgeleitet davon, stellt Engineeringdatenlogistik den Datenfluss von Engineeringdaten, für die vorliegende Arbeit speziell innerhalb des Anlagenentstehungsprozesses, dar. Die beschriebenen Entwurfsnetzwerke können dabei, wie in Abbildung 34 und Abbildung 35 dargestellt, als direkte oder indirekte Datenaustauschstrukturen umgesetzt sein, beinhalten aber immer Datenquellen und Datensinken. Datenquellen erzeugen Daten und geben diese weiter, wohingegen Datensinken Daten von anderen Entwurfsaktivitäten benötigen. Die Entwurfsaktivitäten an sich können sowohl Datenquellen als auch Datensinken sein. In fast allen Fällen müssen Daten auf dem Weg zwischen Datenquelle und Datensinke transformiert werden, was bedeutet, dass die Daten so aufbereitet werden müssen, dass die Datensinke die Daten der Datenquelle verarbeiten kann. [183]

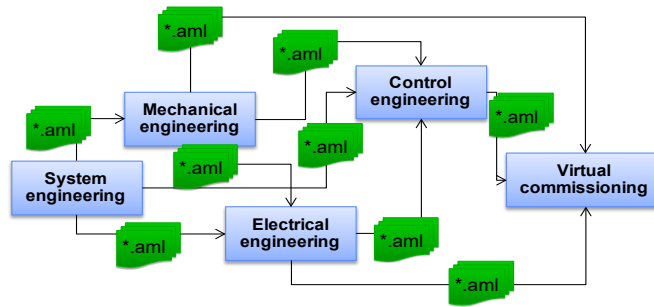


Abbildung 34: Direkte Datenaustauschstruktur [183]

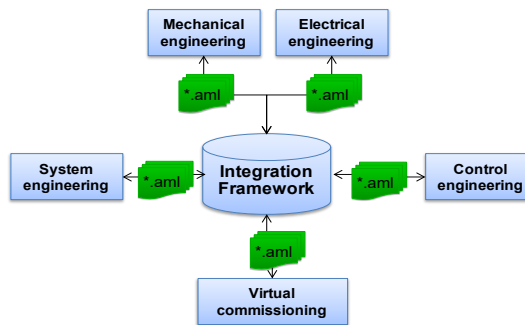


Abbildung 35: Indirekte Datenaustauschstruktur [183]

In der Forschung sind einige spezifische Beiträge zu finden, welche die Informationslogistik zwischen zwei oder mehr Engineering Disziplinen beleuchten. Ein Beispiel im Bereich der Layoutplanung ist in [184] zu finden, welches die Interoperabilität zwischen Tools der Layoutplanung untersucht. Dabei stellt der Autor fest, dass beim bidirektionalen Datenaustausch mit IFC häufig Interoperabilitätsprobleme auftreten. Die Ergebnisse der Untersuchungen von [184] zeigen, dass die grundlegenden Ursachen für Interoperabilitätsprobleme wie folgt aussehen: (a) Software-Tools können mehrere Objekte, die zu anderen Disziplinen gehören, aufgrund des unterschiedlichen Fachwissens nicht gut interpretieren; (b) Software-Tools haben unterschiedliche Methoden, um dieselbe Geometrie, Eigenschaften und Beziehungen darzustellen, was zu inkonsistenten Modelldaten führt. Diese Erkenntnisse können über den Bereich der Layoutplanung hinaus auch auf den disziplinübergreifenden Datenaustausch im gesamten Anlagenentstehungsprozess übertragen werden. So haben [185] sechs Anforderungen an die Engineeringdatenlogistik definiert, welche auch für die vorliegende Arbeit als relevant erachtet werden. Aus Sicht der Autoren müssen

folgende Anforderungen von einer Lösung zur Umsetzung der Datenlogistik erfüllt werden:

- Möglichkeit zum Abruf von Daten aus der lokalen Datenbank des Senders
- Umwandlung der Daten in ein globales Datenschema
- Standardisierung des Datenschemas
- Herstellen von Beziehungen innerhalb des Datenschemas und Bezug zur zugehörigen Aktivität
- Umwandlung vom globalen in das lokale Datenbankschema des Empfängers
- Speicherung der Daten dort

Im Folgenden werden etablierte Konzepte für die Datenspeicherung und den Datenaustausch im Engineering Umfeld vorgestellt, die die o.g. Kriterien bereits teilweise oder ganz erfüllen [186].

Einen wichtigen Befähiger für die Realisierung einer innovativen Engineeringdatenlogistik stellt die objektorientierte Methode zur Datenmodellierung und –speicherung dar [187]. Dabei erfolgt der Datenaustausch jedoch über individuelle Punkt-zu-Punkt Verbindungen. Ein weiteres Konzept für den Datenaustausch ist die Verwendung von Ontologien als gemeinsame semantische Grundlage für die Datenmodellierung [188, 189]. Darüber hinaus hat sich die Verwendung von XML (Extensible Markup Language) zur Modellierung und zum Austausch von Daten etabliert. Bei XML handelt es sich um eine Beschreibungssprache, die menschen- und maschinenlesbar ist und in der Lage ist, verschiedenste Daten zu beschreiben [190]. Aus diesem Grund wird XML bereits in vielen Tools und Datenmodellen verwendet, beispielsweise zur Abbildung und zum Austausch des PPR-Modells (Produkt, Prozess und Ressource) zwischen heterogenen Systemen [191]. Eine weitere sehr verbreitete Methode ist die Nutzung des STEP-Formats (Standard for the Exchange of Product Model Data) zum Datenaustausch, welcher durch die ISO 10303 beschrieben wird und eine Familie von Standards zur Beschreibung von Produktdaten während des gesamten Lebenszyklus darstellt [192]. STEP wird meist in computergestützten Konstruktions- (CAD) und Produktdaten-/Lebenszyklusmanagementsystemen (PDM/PLM) verwendet, ist jedoch weniger

geeignet für die Produktionsüberwachung und -steuerung [193, 194]. Im Rahmen der Gebäudeplanung wird das sog. Building Information Modeling (BIM) eingesetzt. Dabei handelt es sich um eine kooperative Arbeitsmethodik, mit der die relevanten Informationen und Daten eines Bauwerks auf der Grundlage digitaler und standardisierter Modelle konsistent erfasst, verwaltet und in einer transparenten Kommunikation zwischen den Beteiligten ausgetauscht oder für die weitere Bearbeitung übergeben werden [195]. Das jüngste Datenformat, welches zum Datenaustausch im Engineering Umfeld genutzt wird, ist das Computer Aided Engineering Exchange (CAEX). Dabei handelt es sich um ein abstraktes objektorientiertes Datenformat auf Basis von XML, das reale oder logische Anlagenobjekte in Form von Datenobjekten beschreibt. Dieses Konzept ist nicht nur für den Austausch von Informationen von der Feld- zur Unternehmensebene nützlich, sondern auch für den Austausch von Informationen verschiedener Anwendungen auf höheren Ebenen [196]. CAEX wird vom AutomationML e.V. als ein Metamodell für die Speicherung und den Austausch von Engineering-Modellen definiert und wird bereits zur Modellierung von Industrieanlagen und zum Datenaustausch in der Engineering-Kette von Produktionssystemen verwendet [196, 197]. Das vom AutomationML e.V. verwendete CAEX-Format ist daher für die vorliegende Arbeit von besonderer Bedeutung und erfüllt alle o.g. Kriterien.

Die wichtigsten Bestandteile und die Nutzung des Formats zur Erstellung von Modellen werden im Folgenden in Anlehnung an [186] erläutert.

- Hierarchie von Komponenten (Instance-Hierarchy (IH)) von der obersten Ebene bis hinunter zu einzelnen Komponenten (InternalElements, (IEs)) mit Schnittstellen (ExternalInterfaces, (EIs)) und Beziehungen (InternalLinks, (ILs)).
- Wiederverwendbare SystemUnitClasses (SUCs), die Komponententypen definieren.
- Wiederverwendbare Rollendefinitionen für abstrakte Beschreibungen von Komponenten (RoleClasses, RCs).
- Wiederverwendbare InterfaceClasses (ICs) zur Spezifizierung von Verbindungspunkten von RCs, SUCs und dem Schnittstellentyp von EIs.

- Attribute zur Beschreibung der Eigenschaften jedes zuvor eingeführten Modellierungselements

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das von AutomationML e.V. vorgeschlagene und verwendete CAEX-Format sehr gut für die Modellierung und den Datenaustausch im Bereich des Anlagenentstehungsprozesses geeignet ist und für die weitere Verwendung in der vorliegenden Arbeit herangezogen werden kann.

Ein weiterer Beitrag [198] untersucht einen zukunftsweisenden Ansatz für die Modellierung und Nutzung aller notwendiger Informationen, die für die automatische Integration von Engineeringdaten notwendig ist. Dazu wird eine Methode der Engineeringdaten-Logistik vorgeschlagen, um die Daten in ein Gesamt-Netzwerk zu integrieren. Dazu entwickeln die Autoren eine Architektur bestehend aus flexiblen Tool-Adaptoren sowie einer zentralisierten Datenlogistik. Um die richtigen Daten zu identifizieren, die innerhalb des Engineeringnetzwerks ausgetauscht werden sollen, entwickeln die Autoren zudem ein Metadatenmodell, um die Sichten aller Stakeholder bedienen zu können.

#### 4.5 Vorgehen zur Bewertung von Engineering Prozessen

Die heute gelebten Prozesse im Engineering von Anlagen entsprechen an vielen Stellen nicht mehr den Anforderungen, die die zunehmende Etablierung der virtuellen Fabrik und die Umsetzung von „Industrie 4.0“ nach sich ziehen. Um jedoch eine aussagekräftige, vergleichbare und reproduzierbare Bewertung dieser Engineeringprozesse vornehmen zu können, ist die Anwendung einer Bewertungslogik angemessen. Im Umfeld internationaler sowie nationaler Standardisierung lassen sich passende Ansätze finden. Der internationale Standard ISO 9000 sowie ISO 9001 gibt Hilfestellungen zum Qualitätsmanagement im Bereich des Software Engineerings [199, 200]. In der weiterführenden Norm ISO 90003 sind konkrete Richtlinien zur Anwendung der ISO 9001 zu finden, was für die praktische Anwendung einen großen Mehrwert bietet [201].

Die in ISO 9000 beschriebenen Grundsätze des Qualitätsmanagements lauten [199]:

- Kundenorientierung
- Führung
- Einbeziehung von Personen
- Prozessorientierter Ansatz
- Verbesserung
- faktengestützte Entscheidungsfindung
- Beziehungsmanagement

Weitere Details des Qualitätsmanagements in der Softwareentwicklung sind in ISO 9001 beschrieben und beinhalten die klare Formulierung der zu erfüllenden Aufgaben, die Definition von Verantwortung und Zuständigkeiten, die Bereitstellung der erforderlichen Mittel, die Überwachung der Durchführung von Prozessen sowie die Bewertung des Erfolgs und schließlich die systematische Identifikation von Risiken und Chancen [200].

Beide Normen beinhalten sehr generische Kriterien, wovon alle für die vorliegende Arbeit als relevante Grundprinzipien für die Gestaltung von Engineeringprozessen betrachtet werden können. Um zusätzlich einen spezifischen Bewertungsansatz für Engineeringprozesse in der Industrie zu identifizieren, wird die VDI Richtlinie 3695 herangezogen [10]. Darin wird davon ausgegangen, dass die Effektivität und Effizienz des Engineerings sowie die Qualität der Ergebnisse von bestimmten Randbedingungen, Voraussetzungen und Einflüssen abhängt, die in der Richtlinie als Aspekte bezeichnet werden. Jeder Aspekt kann verschiedene Zielzustände haben und dementsprechend befindet sich ein Unternehmen hinsichtlich der einzelnen Aspekte jeweils in einem Ist-Zustand. Die Zielzustände können schrittweise über das Umsetzen von Maßnahmen erreicht werden und bedingen sich teilweise gegenseitig. Für die Anwendung des Zielzustandsmodells wird in der Richtlinie folgende Vorgehensweise vorgeschlagen: [10]

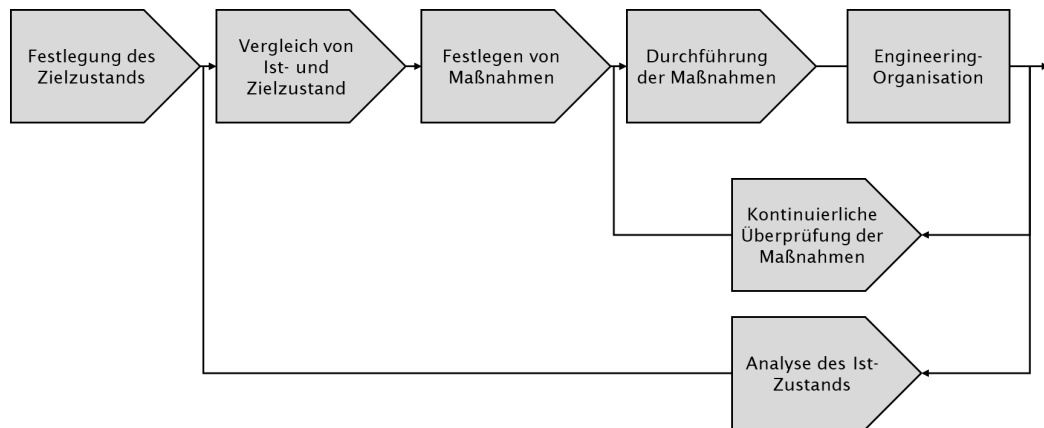


Abbildung 36: Vorgehensweise zur Anwendung der VDI-Richtlinie 3695 [10]

Im folgenden Kapitel werden aus der Gesamtheit, der in VDI 3695 beschriebenen Zielzustände, die für die vorliegende Arbeit relevanten erläutert.

#### 4.5.1 VDI 3695 Zielzustandsmodell

Die Auswahl der relevanten und erstrebenswerten Zielzustände aus der VDI 3695 Richtlinie erfolgen auf Basis der von [179] identifizierten Merkmale von durchgängigem (digitalen) Engineering. In Tabelle 2 ist eine Übersicht über das jeweilige Merkmal durchgängigen Engineerings und dem entsprechenden Zielzustand dargestellt.

Merkmal [179]	Zielzustand
Wertschöpfungsprozess-übergreifend genutzte Informationsmodell	Gewerkeintegration und -durchgängigkeit [202]
Erstellung und Nutzung von Werkzeugketten	Wiederverwendbarkeit [202] Durchgängigkeit der Werkzeugkette [203] Spezifische Engineering Werkzeuge [203]

Verwendung einer einheitlichen Syntax und Semantik	Beschreibungsmittel [202]
gemeinsames Vorgehensmodell	Prozesse (Vorgehensmodell für Projektarbeiten, Vorgehensmodell für projektunabhängige Tätigkeiten) [204]

*Tabelle 2: Mapping der Merkmale durchgängigen Engineerings [179] mit den Zielzuständen aus [10]*

Zur Erreichung eines Wertschöpfungsprozess-übergreifenden Informationsmodells ist die Realisierung des Zielzustands „Gewerkeintegration und -durchgängigkeit“ [202] ein wichtiger Befähiger. Durch die Durchgängigkeit der Gewerke über den gesamten Lebenszyklus soll die Abstimmung der Ergebnisse der beteiligten Gewerke optimiert werden und bereits in den frühen Phasen Konsistenz und Interoperabilität zwischen den Gewerken sichergestellt werden. Die Richtlinie definiert dazu drei Zielzustände beginnend bei einer rein gewerkespezifischen Anlagenstruktur, über eine partiell gewerkeübergreifenden Anlagenstruktur bis hin zum eigentlichen Zielzustand, der gewerkeübergreifenden Anlagenarchitektur. Dort findet ein kontinuierlicher Datenaustausch zwischen den Engineeringphasen statt, welcher auf einem gemeinsamen Referenzmodell basiert. Dieses Vorgehen wird in Abbildung 37 verdeutlicht. Dadurch können mehr Transparenz und Konsistenz im gesamten Anlagenentstehungsprozess, klare Schnittstellen und die Befähigung gewerkeübergreifender Zusammenarbeit erreicht werden. Das einheitliche Informationsmodell begünstigt wiederum den Einsatz von einheitlichen Modellen und Beschreibungssprachen. [202]



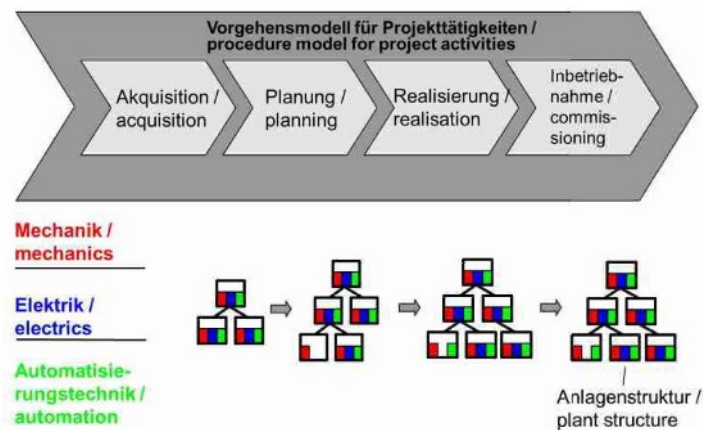


Abbildung 37: Gewerkeübergreifende Anlagenarchitektur [202]

Diese einheitlichen Modelle und Beschreibungssprachen aus [202] sind im Sinne von [9] intangible Assets und sind dementsprechend selbst Artefakte der Wertschöpfungskette. Dabei stellen die Beschreibungssprachen die Werkzeuge zur Erstellung von Modellen dar. Zur Realisierung durchgängiger digitaler Planung sollen die Syntax und Semantik standardisiert sein und den Informationsgehalt von Modellen und Prozessen optimal unterstützen. In der Richtlinie werden vier Zielzustände beschrieben. Der Zielzustand mit den niedrigsten Anforderungen besteht darin, dass Modelle mithilfe strukturierter Beschreibungssprachen erstellt werden. Der nächste Zielzustand fordert, dass die erstellten Modelle in digitaler Form vorliegen, und darauf folgt der dritte Zielzustand, wobei ein einheitlicher Modellierungskodex im Unternehmen existieren muss. Für die vorliegende Arbeit und dementsprechend die Annäherung an ein durchgängiges digitales Engineering wird Zielzustand D aus [202] angestrebt. Hier wird bei der Modellbeschreibung auf standardisierte Modelle gesetzt, welche den gesamten Lebenszyklus der Anlage beschreiben. Außerdem findet ein Austausch zwischen den Beschreibungssprachen statt. Dadurch ergeben sich zahlreiche Chancen für durchgängiges Engineering der Anlage ohne unnötiges, mehrfaches Eingeben gleicher Sachverhalte. Außerdem verringert der weitestgehend automatisierte Datenaustausch zwischen den Modellen die Fehleranfälligkeit beim Übertragen der Daten und die Verwendung von standardisierten Sprachen erweitert zudem die Palette der einsetzbaren Werkzeuge. [202]

Bei der Verwendung von standardisierten Modellen und Beschreibungssprachen spielt die Wiederverwendbarkeit aus [202] ebenfalls eine wichtige Rolle. Die Wiederverwendbarkeit von Artefakten, Modellen und Daten im Allgemeinen ermöglicht letztendlich die Optimierung des Engineering-Prozesses hinsichtlich Kosten, Zeitaufwand, Qualität der Lösung sowie dem Wartungsaufwand. Die Zielzustände, die in [202] beschrieben werden starten damit, dass die Wiederverwendung selbstständig von Mitarbeitern betrieben wird. Weiterhin beschreibt der nächste Zielzustand, dass die Wiederverwendung im Projekt gesteuert wird, und darüber hinaus wird die Wiederverwendung projektübergreifend von zentraler Stelle aus gesteuert (Zielzustand C). In Zielzustand D aus der Richtlinie basiert die Wiederverwendung auf einem Referenzmodell. Für die Wiederverwendung wird ebenfalls der höchste Zielzustand angestrebt, wobei diese auf internen und externen Standards beruht. Die Potenziale dieses Zielzustands sind vielfältig. So tragen genormte Artefakte zur Vereinheitlichung von Schnittstellen und Automatisierungslösungen bei und erleichtern Änderungen und Anpassungen, wodurch Kosten und Zeit gespart werden können. Außerdem kann die Anbindung an Fremdsysteme und zugekaufte Artefakte erleichtert werden. [202]

Die Wiederverwendbarkeit zählt ebenso wie die Durchgängigkeit der Werkzeuge auf die Erstellung und Nutzung von Werkzeugketten ein [179, 202, 203].

Die Durchgängigkeit der Werkzeuge aus [203] beschäftigt sich mit den Werkzeugen (im Sinne von Tools oder anderweitigen Softwareprodukten) entlang des Wertschöpfungsprozesses des Engineerings und darüber hinaus entlang des gesamten Lebenszyklus einer Anlage. Um diesen Lebenszyklus möglichst effizient zu durchlaufen, ist eine optimale Integration der Werkzeuge in die Arbeitsabläufe notwendig. Dazu müssen auch die Daten und Informationen zwischen diesen Werkzeugen elektronisch austauschbar sein, um menschliche Fehler bei der Übertragung zu vermeiden. Diese Integration oder Durchgängigkeit der Informationen bezieht sich auf alle Aufgaben und Abläufe, darunter können kaufmännische, administrative oder technische Aspekte fallen und dabei sowohl organisationsintern als auch organisationsübergreifend angesiedelt sein. Auch für die Durchgängigkeit der Werkzeuge werden vier Zielzustände beschrieben. Zunächst

definiert [203] Zielzustand A so, dass die Planungsdaten einer Anlage elektronisch als Dokument vorliegen müssen und so viele Arbeitsabläufe des Anlagenlebenszyklus dokumentiert werden können. Bei Zielzustand B liegen die Planungsdaten einer Anlage als auswertbare Daten vor und die Arbeitsabläufe sind nicht nur dokumentiert, sondern haben sich bereits etabliert und bleiben von Projekt zu Projekt gleich. Die Daten und Arbeitsabläufe sind außerdem einander zugeordnet und miteinander verknüpft, dabei werden oft spezifische Engineering-Werkzeuge zur Datenerstellung/-veränderung eingesetzt. In Zielzustand C gibt die Richtlinie vor, dass die Planungsdaten einer Anlage elektronisch zwischen Werkzeugen entsprechend den Arbeitsabläufen ausgetauscht werden können und dass Importmechanismen für alle Werkzeuge vorhanden sind und dementsprechend die Manipulation der Daten von außen erlaubt. Der angestrebte Zielzustand D wird so beschrieben, dass die Planungsdaten einer Anlage bei Änderungen automatisch und elektronisch zwischen Werkzeugen entsprechend den definierten Arbeitsabläufen ausgetauscht werden. Dieser automatische Datenaustausch ist ein zentraler Befähiger des durchgängigen digitalen Engineerings, da somit die Konsistenz und Durchgängigkeit über alle Phasen des Lebenszyklus gewährleistet wird und die Verarbeitung der Daten maßgeblich beschleunigt und vereinfacht wird. Durch die Verwendung standardisierter Modelle und Beschreibungssprachen kann bei großem Abdeckungsgrad und Akzeptanz innerhalb der Werkzeugketten der Implementierungsaufwand deutlich reduziert werden. Die einmalige Eingabe von Daten (Single Point of Data Input) verringert die Fehlerrate und leistet einen Beitrag zur Datendurchgängigkeit. [203]

Aus Sicht der Werkzeugketten sind außerdem spezielle Engineering Werkzeuge wichtig [203]. Darunter fallen bestimmte Hilfsmittel, wie SPS-Simulatoren, Feldbus-Analysatoren und Programmiergeräte. Diese speziellen SW-Werkzeuge sind für die Umsetzung durchgängigen digitalen Engineerings unerlässlich, da sie den Mitarbeiter beim Engineering-Prozess unterstützen, indem optimierte Prozessabläufe, vordefinierte Vorlagen, einfache Bedienung und Verwendung standardisierter Beschreibungsmittel zur Verfügung gestellt werden. Die Richtlinie unterscheidet an dieser Stelle nur zwischen zwei Zielzuständen. In der Basisbefähigung (Zielzustand A) entsprechen die eingesetzten speziellen Engineering-Werkzeuge dem Stand der

Technik und stehen in einer aktuellen Version zur Verfügung. Der anvisierte Zielzustand B schreibt vor, dass die Werkzeuge ebenfalls dem Stand der Technik entsprechen und die Mitarbeiter für diese Werkzeuge geschult werden. Qualifizierungsmaßnahmen sind an vielen Stellen des durchgängigen digitalen Engineerings von großer Bedeutung, da durch den angemessenen Einsatz von Werkzeugen durch gut geschulte Mitarbeiter in der Regel eine höhere Qualität und eine Verkürzung der Abwicklungszeit erreicht werden kann. [203]

Abschließend lässt sich sagen, dass die Erreichung der beschriebenen Zielzustände unerlässlich für die Umsetzung der virtuellen Fabrik, sowie der Durchgängigkeit im Engineering und der Industrialisierung diverser innovativer Technologien ist. Aus diesem Grund wird der Zielerreichungsgrad der jeweiligen Zielzustände im weiteren Verlauf der Arbeit als Reifegradmodell für die Bewertung der Auswirkungen durch die Anwendung der zu entwickelnden ganzheitlichen Transformationsstrategie in Richtung des durchgängigen digitalen Engineerings verwendet.

#### 4.6 Zusammenfassung

Nach einer allgemeinen Erläuterung der einzelnen Prozessschritte im Anlagenengineering bzw. in der Fabrikplanung, folgt die Darstellung eines generischen Prozesses, der als Zusammenfassung oder Aggregation der zuvor beschriebenen Prozessschritte fungiert und dementsprechend anhand der Prozessschritte aus Kapitel 4.1 umgesetzt werden kann. Um den Ansprüchen nach zunehmender Digitalisierung gerecht zu werden, kann durchgängiges digitales Engineering als zentrale Komponente für die Optimierung innerhalb der einzelnen Prozessschritte (Kapitel 4.1) und infolgedessen auch des generischen Gesamtprozesses (Kapitel 4.2) betrachtet werden. Zur konkreten Umsetzung durchgängigen digitalen Engineerings bedarf es einer effektiven und effizienten Engineeringdatenlogistik entlang des gesamten Prozesses, welche in Kapitel 4.5 beschrieben wird. Durch die Umsetzung von Maßnahmen, welche durchgängiges digitales Engineering ermöglichen (z.B. Optimierung Engineeringdatenlogistik) und der damit verbundenen zunehmenden Digitalisierung des Engineeringprozesses wird dieser sich an verschiedenen Stellen verändern. Um diese Veränderungen transparent

und messbar zu machen, bietet sich die Verwendung einer Bewertungsmethodik an. Dafür wird das Zielzustandsmodell nach VDI 3695 vorgeschlagen und vorgestellt.

## 5 Definition der Forschungslücke und Ableitung der Forschungsfragen

Auf Basis der bisherigen Erkenntnisse, lassen sich für die vorliegende Arbeit folgende Forschungsfragen definieren.

Um zu verstehen, wie sich die Engineeringprozesse, welche in Kapitel 4.1 beschrieben wurden, durch die Entwicklung und den Einsatz von digitalen Zwillingen (vgl. Kapitel 2.2 und 2.3) ändern, untersucht **RQ1** die Dimension Prozess: Wie verändert sich der Engineeringprozess von Produktionssystemen durch durchgängiges digitales Engineering? Dabei werden verschiedene prozessuale Aspekte innerhalb des Anlagenentstehungsprozesses beleuchtet und insbesondere auf die Auswirkungen der in Kapitel 4.3 und 4.4 beschriebenen Umsetzungen untersucht.

Die Umsetzung durchgängigen digitalen Engineerings erfordert, wie in den Kapiteln 2.3, 4.3 und 4.4 beschrieben, einige technische Rahmenbedingungen. Diese Rahmenbedingungen müssen anhand verschiedener Maßnahmen geschaffen werden. Dazu wird anhand **RQ2** die Dimension Technik betrachtet: Welche Auswirkungen sind auf Datenmodelle, Datenaustauschformate und Tool(ketten) bzw. die IT-Architektur generell zu erwarten?

Für das Gelingen der digitalen Transformation spielt die Organisation sowie die Mitarbeitenden, wie in Kapitel 2.3.3 dargelegt, eine wichtige Rolle. In diesem Zusammenhang ist es notwendig, entsprechendes Know-How in den Unternehmen zu schaffen und durch geeignete Organisationsstrukturen Silodenken oder Prozessbrüche zu vermeiden. Neben den genannten Aspekten, beschäftigt sich **RQ3** generell mit der Frage: Welche Auswirkungen sind für Organisationformen in den Unternehmen zu erwarten?

Als Kombination der drei Dimensionen wird mit **RQ4** der Schwerpunkt auf die Ganzheitlichkeit und die Einordnung der einzelnen Maßnahmen in ein übergeordnetes Rahmenwerk gelegt. Aus diesem Grund soll die Frage beantwortet werden, wie eine ganzheitliche Transformationsstrategie in Richtung durchgängigen digitalen Engineerings aussieht.

Um für verschiedene Unternehmen und Situationen die richtige Transformationsstrategie zu finden, bedarf es der Beantwortung von **RQ5**. Auf Basis der in Kapitel 2.3.4 definierten Kriterien sowie des in Kapitel 3.5 durchgeführten Vergleichs von bestehenden Transformationsstrategien findet eine Annäherung an die Frage statt, anhand welcher Kriterien diese Transformationsstrategie ausgewählt und bewertet werden kann?

Abschließend soll im Sinne einer Aggregation der Erkenntnisse aus der Anwendung der definierten Transformationsstrategie eine konkrete Bewertung des Erfolgs ermöglicht werden. Dazu wird anhand **RQ6** beantwortet, ob die zu erwartenden Auswirkungen durch eine geeignete ganzheitliche Transformationsstrategie positiv beeinflusst werden können.

## 6 Beschreibung des IST-Prozesses in der Automobilindustrie

Um eine ganzheitliche Transformationsstrategie ableiten zu können, die aus den drei Säulen Technik, Prozess und Organisation besteht, ist unter anderem das tiefe Verständnis über die aktuell gelebte Prozesslandschaft nötig. Die vorliegende Arbeit legt den Fokus auf die Transformation in Richtung eines durchgängigen digitalen Engineerings von Produktionssystemen in der Automobilindustrie. Aus diesem Grund erfolgen alle Betrachtungen in den folgenden Kapiteln auf Basis der deutschen Automobilindustrie. Das Vorgehen zur Identifikation des IST-Prozesses wird im Folgenden beschrieben. Im Rahmen des Projekts DIAMOND [73] werden aktuell alle Engineeringprozesse rund um die Anlagenentstehung detailliert betrachtet und beschrieben. Die Ergebnisse sind unter [205] einsehbar. Der dort beschriebene generische Anlagenentstehungsprozess entspricht in großen Teilen dem im folgenden erarbeiteten gelebten Prozess und kann demnach als Validierung für die Inhalte des folgenden Kapitels betrachtet werden.

### 6.1 Durchführung und Ergebnisbetrachtung der Experteninterviews

#### 6.1.1 Beschreibung der Interviewdurchführung

Um ein besseres Verständnis über den aktuell gelebten Anlagenentstehungsprozess zu bekommen, wurde über einen Zeitraum von sechs Monaten eine Workshopserie mit 35 Planenden für das Produktionssystem eines deutschen Automobilherstellers aus verschiedenen Bereichen und mit verschiedenen Aufgaben durchgeführt. Die Teilnehmer trafen sich wöchentlich für drei Stunden in einem virtuellen Raum und haben unter Anleitung eines Prozessspezialisten ihren gelebten Prozess beschrieben. Alle Ergebnisse der Workshops sind grafisch und textuell dokumentiert. Zu Beginn der Workshopreihe wurde in Anlehnung an Kaizen eine Verschwendungsanalyse (s. Kapitel 6.1.2) der aktuellen Herausforderungen durchgeführt, um die größten Hebel für zukünftige Optimierungen zu erkennen. Im Anschluss daran wurden gemeinsam Zielbilder formuliert, die der Anlagenentstehungsprozess ab 2026 in den Augen der Planer erfüllen soll. Auf Basis der Zielbilder sowie unter Beachtung aktuell in Entwicklung befindlicher Projekte wurde im Anschluss die Definition des



Zielprozesses, der ab dem Jahr 2026 lebbar sein soll, vorgenommen. Abschließend wurden Maßnahmen entwickelt, um dieses Zielbild zu erreichen und Kennzahlen definiert, die den Fortschritt messbar machen. Das beschriebene Vorgehen wurde von [206] geleitet und im Rahmen der vorliegenden Arbeit intensiv begleitet. Einige relevante Ergebnisse aus der Workshopreihe werden im folgenden Kapitel beschrieben und mit den in Kapitel 4.5.1 vorgestellten Zielzuständen nach VDI 3695 in Verbindung gebracht. Zusätzlich wurden Experteninterviews durchgeführt, um eine aggregierte Darstellung des gelebten IST-Prozesses (siehe Kapitel 6.2) über alle Bereiche hinweg ableiten zu können.

### 6.1.2 Ergebnisübersicht

Im Folgenden werden Ergebnisse aus der Workshopreihe beschrieben, welche für das Verständnis und die Einordnung des gelebten Anlagenentstehungsprozesses hilfreich sind. Im Rahmen der nach Kaizen durchgeführten Verschwendungsanalyse werden von den Teilnehmern insgesamt 97 Schwächen bzw. „Muda“ genannt. Diese Schwächen lassen sich grob in die folgenden vier Kategorien einteilen:

- Mangelnde Datenverfügbarkeit (hinsichtlich Qualität, Datenaustausch und Datenaktualität)
- Schwächen im Prozess oder der Organisation (z. B. Wartezeiten oder Schnittstellenthematiken)
- Fehlende oder nicht gelebte Standardisierung
- Probleme mit den Planungstools (z. B. fehlende Durchgängigkeit)

Eine Übersicht über die Häufigkeit der Nennungen je Kategorie ist in Abbildung 38 dargestellt. Die genannten Schwächen werden von den Teilnehmern zudem gewichtet, indem entweder ein, zwei oder drei „Minuszeichen“ je Schwäche je Teilnehmer vergeben werden können. Eine Übersicht über die Gesamtzahl und somit die Gesamtgewichtung der Schwächen je Kategorie ist Abbildung 39 zu entnehmen. Dieses Ergebnis unterstreicht die bisherigen Erkenntnisse und Annahmen der vorliegenden Arbeit dahingehend, dass sich die drei festgelegten Dimensionen der Transformation in den identifizierten Schwächen eindeutig wiederfinden.



Abbildung 38: Anzahl der Nennungen von Verschwendungsquellen im Prozess

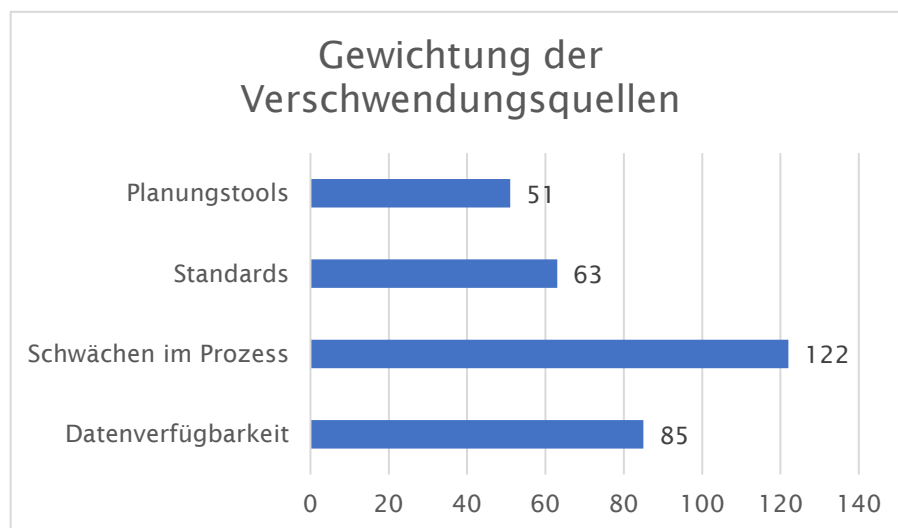


Abbildung 39: Absolute Gewichtung der Verschwendungsquellen

Die anschließende Erarbeitung von Zielsätzen für den zukünftigen Anlagenentstehungsprozess folgt demselben Schema wie die Kategorisierung der Schwächen. Die Teilnehmer nennen insgesamt 96 Zielsätze, die ihnen für die Zukunft im Kontext des Anlagenentstehungsprozesses wichtig sind. Diese 96 Zielsätze lassen sich neun Zielkategorien zuordnen, welche anschließend hinsichtlich ihres positiven Einflusses auf die drei Faktoren Zeit, Qualität und Kosten bewertet werden. Die Zielsätze sowie das Ergebnis der Bewertung durch die Teilnehmer sind Abbildung 40 zu entnehmen. Die markierten Zeilen stellen je Kategorie jeweils die am besten bewertete Zielkategorie dar.

Zielkategorie	Zeitersparnis	Qualitätserhöhung	Kosteneinsparung
Automatisierte Funktionen und Simulationen	22	16	11
Anreicherung des digitalen Anlagenabbilds	17	17	9
Common data management als zentrale Datenplattform	29	24	10
Modulare standardisierte Baukastenbibliotheken	22	22	11
Verwendung von Daten aus dem Betrieb im Engineering	19	25	10
Intelligentes Produkt	11	13	9
Ein gemeinsames Layout als Basis	27	22	9
Synchronisierte und automatisierte Workflows	25	17	15
Lerneffekt aus vergangenen Projekten	26	24	18
Dynamischer Terminplan im Prozess	23	20	6

Abbildung 40: Absolute Bewertung Zielkategorien

Die im Workshop formulierten Zielkategorien (im Folgenden „Zielsätze“ genannt) lassen sich auch in der in Kapitel 4.5.1 abgeleiteten Tabelle wiederfinden, sodass die Tabelle um die Zielsätze erweitert werden kann.

Merkmal [179]	Zielzustand (VDI 3695)	Zielsätze
Wertschöpfungsprozess- übergreifend genutzte Informationsmodell	Gewerkeintegration und - durchgängigkeit [202]	- Anreicherung des digitalen Anlagenabbilds  - common data management  - Verwendung von Daten aus dem Betrieb im Engineering  - ein gemeinsames Layout als Basis
Erstellung und Nutzung von Werkzeugketten	Wiederverwendbarkeit [202]  Durchgängigkeit der Werkzeugkette [203]  Spezifische Engineering Werkzeuge [203]	- Automatisierte Funktionen und Simulationen  - intelligentes Produkt

Verwendung einer einheitlichen Syntax und Semantik	Beschreibungsmittel [202]	– modulare Baukastenbibliotheken
gemeinsames Vorgehensmodell	Prozesse (Vorgehensmodell für Projektaktivitäten, Vorgehensmodell für projektunabhängige Tätigkeiten) [204]	<ul style="list-style-type: none"> <li>– synchronisierte und automatisierte Workflows</li> <li>– Lerneffekt aus vergangenen Projekten</li> <li>– dynamischer Terminplan im Prozess</li> </ul>

*Tabelle 3: Merkmale durchgängigen digitalen Engineerings, Zielzustände nach VDI 3695 und Zielsätze*

Im folgenden Kapitel erfolgt die Darstellung des gelebten Anlagenentstehungsprozesses inklusive der verwendeten Tools über alle Bereiche eines Automobilherstellers hinweg aggregiert. Die Inhalte aus Tabelle 3 können anschließend für die Definition des Soll-Prozesses herangezogen werden.

## 6.2 Workflowmodellierung und Beschreibung der Toolketten des definierten IST-Anlagenentstehungsprozesses

Die Zuordnung der Prozessschritte auf grober Ebene erfolgt in Anlehnung an den in Kapitel 4.2 beschriebenen generischen Anlagenentstehungsprozess. Die folgenden Beschreibungen basieren auf durchgeführten Experten-Interviews [207] und [208]. Anhang A stellt den IST-Anlagenentstehungsprozess inklusive verwendeter Tools und beteiligter Rollen dar. Im Folgenden wird dieser Prozess genauer beschrieben.

Zur Einleitung der frühen Phase des Anlagenentstehungsprozesses findet die Übergabe der Anforderungen an das Produktionssystem durch die Fahrzeug-Entwickler an die Anlagenplanung statt. Bevor die konkrete Planung einer Anlage in der frühen Phase beginnt, ist die Bereitstellung entsprechender technischer Standards (z. B. Best-Practise Komponenten Bibliothek) erforderlich. Dies geschieht über ein

Asset Management Tool und wird durch den Layoutplaner angestoßen. Anschließend wird in der frühen Phase das Groblayout mit Tools wie Microstation<sup>1</sup> oder Autodesk<sup>2</sup> durch den Layoutplaner erstellt. Parallel zur Erstellung des Detail-Layouts in der Phase der Feinplanung, findet die Ablaufsimulation statt. Mit dieser Simulation wird die Identifikation der optimalen Anordnung des Produktionssystems unterstützt. Die Ablaufsimulation wird von Spezialisten mit Tools wie z. B. PlantSimulation<sup>3</sup> durchgeführt. Die Planung des Detaillayouts ist der des Groblayouts sehr ähnlich, außer dass nun zusätzlich ein Einrichtungstechniker involviert ist. Im weiteren Verlauf wird die Anlage mechanisch konstruiert und die Elektrokonzeption vorgenommen. Die mechanische Konstruktion kann mithilfe von Tools, wie z. B. CATIA<sup>4</sup> durchgeführt werden und wird von einem Konstruktionsspezialisten vorgenommen. Der Steuerungstechniker sowie der Hardwareplaner definieren gemeinsam das Elektrokonzept der Anlage und nutzen dazu beispielsweise Excel oder Visio. Im direkten Anschluss daran kann die konkrete Elektroplanung (unter Nutzung von Tools wie EPLAN<sup>5</sup>) erfolgen. Parallel zur Konstruktion und der Elektrokonzeption/-planung erfolgen Geometrie- und Prozesssimulationen. Diese Simulationen werden durch den Konstrukteur und Simulationsspezialisten unter Nutzung von Simulationstools, wie z. B. Process Simulate<sup>6</sup> durchgeführt. Bis hierhin im Prozess ist der Auftraggeber (Automobilhersteller) intensiv beteiligt. Anschließend erfolgt die Umsetzung des Projekts vornehmlich bei einem Anlagenhersteller. Ein Schritt, der parallel zur Umsetzung noch beim Auftraggeber erfolgt, ist die Spezifikation, Parametrierung und

---

<sup>1</sup> <https://de.bentley.com/software/microstation/>

<sup>2</sup> <https://www.autodesk.de/products/revit>

<sup>3</sup> <https://plm.sw.siemens.com/de-DE/tecnomatix/products/plant-simulation-software/>

<sup>4</sup> <https://www.3ds.com/de/produkte-und-services/catia/>

<sup>5</sup> <https://www.eplan.de/loesungen/vorteile-der-eplan-plattform/>

<sup>6</sup> <https://plm.sw.siemens.com/de-DE/tecnomatix/products/process-simulate-software/>

Inbetriebnahme des IT-Leitsystems in enger Abstimmung mit dem SPS-Programmierer beim Auftragnehmer. Der SPS-Programmierer ist parallel bereits mit der Softwareprogrammierung der Anlagensteuerung bzw. des Roboters beschäftigt und testet die Software anhand geeigneter Simulationen des IT-Leitsystems. Parallel dazu beginnen die Spezialisten der virtuellen Inbetriebnahme (VIBN) mit dem Aufbau des virtuellen Modells. Dazu werden aktuell Tools, wie z. B. EKS<sup>7</sup>, SIMLINE<sup>8</sup>, fe.screen<sup>9</sup> oder Eigenentwicklungen verwendet. Anschließend können die VIBN-Spezialisten die VIBN durchführen. Dazu testen sie gemeinsam mit dem Steuerungstechnikplaner und dem Instandhaltungsplaner sowohl das virtuelle Modell als auch die Software der Steuerung. Dazu können dieselben Tools, wie zum Aufbau des virtuellen Modells verwendet werden. Mit dem Fortschritt der virtuellen Inbetriebnahme und somit zunehmendem Reifegrad der Anlage können die jeweiligen Planer bereits mit der Erstellung der Betriebs- und Wartungsanleitungen beginnen. Diese werden nach Abschluss der realen Inbetriebnahme an die Instandhaltung bzw. den Anlagenbetreiber übergeben. Nach erfolgreichem Abschluss der VIBN kann die Anlage im Produktionssystem physisch aufgebaut und real in Betrieb genommen werden. Außerdem müssen die betroffenen Mitarbeiter an der neuen Anlage geschult werden und verschiedene Stresstests mit der Anlage durchgeführt werden. Die in der realen Inbetriebnahme gewonnenen Erkenntnisse werden im Anschluss an das virtuelle Modell zurückgespielt, sodass das virtuelle Modell konsistent mit der physischen Anlage ist. Abschließend werden alle Daten aus dem Planungsprozess als Dokumentation an den Betrieb übergeben und beim Anlauf bzw. der Stabilisierung der Prozesse durch die jeweiligen Spezialisten unterstützt. Ab diesem Zeitpunkt ist der Anlagenentstehungsprozess abgeschlossen und die Anlage befindet sich in der Serienbetreuung bzw. falls nötig in der Weiterentwicklung.

---

<sup>7</sup> <https://www.eks-intec.de/vibn.html>

<sup>8</sup> <https://www.winmod.de/de/produkte/winmod-simline/>

<sup>9</sup> <https://www.fescreen-sim.de/fescreen-sim/>

### 6.3 Aktuelle Datenlandschaft

Im Folgenden werden die Datentypen und -formate entlang des Anlagenentstehungsprozesses aus Sicht der Planungsdisziplinen (gemäß Darstellung in Anhang A – Gelebter Anlagenentstehungsprozess) beschrieben, so wie sie heute entstehen bzw. vorliegen. Außerdem wird darauf hingewiesen, an welchen Stellen im Prozess Probleme bei der Datenübergabe bzw. -Wiederverwendbarkeit entstehen und welche Übergabestellen durch AutomationML oder andere Standards bereits heute verbessert werden können. Dabei wird in erster Linie auf die wichtigsten Datentypen an den Schnittstellen der Planungsdisziplinen und -tools eingegangen.

Anfangen in der Layoutplanung, welche heute mit Microstation (Datenformat: dgn) durchgeführt wird, entstehen bereits erste Hindernisse für durchgängiges digitales Engineering. Die Weiterverwendung des Layouts für durchgängiges Engineering ist nicht möglich, da das Datenformat keine Objektorientierung im Layout ermöglicht. Die Layoutplanung erfolgt in sog. Layern, wobei je Disziplin in einem eigenen Layer geplant wird, sodass am Ende jeweils Layer für die Robotik, die Fördertechnik, etc. vorliegen. In diesem Layer stellen z. B. alle darin befindlichen Roboter ein einziges Objekt dar und sind somit nicht im Sinne des durchgängigen Engineerings nutzbar.

Ein AutomationML-Export aus Microstation ist aktuell nur für Bibliothekselemente möglich, wodurch eine „Objektorientierung light“ erreicht werden kann, die den Anforderungen an durchgängiges Engineering weiterhin nicht gerecht wird. Gelöst wird dieses Problem durch manuelles Nachzeichnen der Layouts in den Tools der nachfolgenden Prozessschritte. Dies ist sehr zeitintensiv und fehlerträchtig und ignoriert weiterhin die benötigte Objektorientierung.

In der Gebäudeplanung hingegen kann diese Objektorientierung durch die Verwendung von Revit (Datenformat: BIM) realisiert werden und es liegt kein Problem aus Sicht des durchgängigen Engineerings vor.

In der mechanischen Konstruktion entstehen Hardwaremodelle in CATIA im Format von CAD-Projects und CAD-Parts. Diese Zeichnungen können durch den Nutzer strukturiert werden, dazu sind aber übergreifend abgestimmte

Konstruktionsrichtlinien für ein einheitliches Anlagenkennzeichnungssystem notwendig. Diese Anforderung stellt heute ein Problem dar, da die Konstruktionsrichtlinien sowie das Anlagenkennzeichnungssystem nur je Technologie (Karosseriebau, Montage, ...) festgelegt sind. Um eine durchgängige Objektorientierung in der digitalen Fabrik zu ermöglichen, und damit durchgängiges digitales Engineering zu befähigen, müssen diese Richtlinien nicht nur technologieübergreifend, sondern im besten Fall branchenweit in Form von Standards eingehalten werden. Nicht nur diese prozessuale Hürde verhindert die Datendurchgängigkeit in der mechanischen Konstruktion, sondern auch der technische Aspekt der Datenhaltung stellt ein Problem dar. In der aktuell verwendeten Version kann die Datenbank zur Speicherung der CAD-Zeichnungen keine anlagenspezifischen Hierarchien abbilden und somit auch keine Objektorientierung unterstützen. In der Nachfolge-Version ist bereits objektorientierte Datenhaltung möglich. Der Migrationszeitpunkt ist aktuell nicht bekannt.

In der elektrischen Konstruktion (Tool: EPLAN) kann bereits heute strukturiert und objektorientiert geplant werden (Projektendung .zw1) und die Hardwarekonstruktion kann über einen Export (AR/APC) strukturiert an Nachfolgetools übergeben werden. Die elektrische Konstruktion (Schaltpläne etc.) kann über einen EPLAN Projektexport und einen Sonder-AutomationML-Export ebenfalls strukturiert, objektorientiert und in einem neutralen Datenformat (AML) an Nachfolgetools übergeben werden. Diese Schnittstelle ist demnach im aktuellen Zustand diejenige, welche bereits die meisten Anforderungen in Richtung Datendurchgängigkeit erfüllt.

Für die Steuerungsprogrammierung (SPS) wird aktuell TIA Portal<sup>10</sup> verwendet, welches den Vorteil bietet, dass die komplette Hardwarekonfiguration über AutomationML von EPLAN importiert werden kann. Lediglich die Signale (z. B. OPC UA Kommunikation) können noch nicht importiert werden und müssen manuell konfiguriert. Ein prozessuales Problem, das in diesem Zusammenhang vorliegt, ist jedoch, dass in TIA

---

<sup>10</sup> <https://www.siemens.com/de/de/produkte/automatisierung/industrie-software/automatisierungs-software/tia-portal.html>



Portal keine interne Struktur vorgegeben wird, die eine einheitliche Bezeichnung der Geräte, Komponenten und Daten unterstützt. Die Bezeichnungen sowie die Strukturierung in logischen Hierarchien liegen allein in der Verantwortung des zuständigen Planers und lassen demnach Raum für Abweichungen. Um eine durchgängige digitale Planung zu ermöglichen, ist auch hier ein einheitliches Bezeichnungskonzept zur Umsetzung der Objektorientierung in den Planungstools unerlässlich und in diesem Fall nicht abschließend sicherstellbar.

Wie bereits in Kapitel 4.1 beschrieben, flankieren verschiedene Simulationen den gesamten Anlagenentstehungsprozess. Diese Simulationen werden meist in Expertentools durchgeführt, welche als Daten-Konsumenten der vorgelagerten Planungstools betrachtet werden können und somit diese Daten möglichst einfach importieren können müssen. Die Ablaufsimulation (in PlantSimulation) benötigt die Layout- und Gebäudedaten und gewisse Prozessinformationen (z. B. Taktvorgaben). Heute ist keine automatische Übergabe der Gebäude- und Layoutinformationen in PlantSimulation möglich und auch eine Objektorientierung ist aufgrund der fehlenden Objektorientierung in Microstation nicht möglich und daher ist auch eine automatische Rückführung von Optimierungen, die in der Simulation erkannt wurden, in das Layout verhindert. Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass ein hoher manueller Aufwand nötig ist, um ein Modell zur Ablaufsimulation aufzubauen.

Ähnlich verhält es sich bei der geometrischen Simulation (ProcessSimulate), welche in erster Linie Daten aus der mechanischen Konstruktion und der Layout- bzw. Gebäudeplanung benötigt. Diese können wie bereits beschrieben nicht automatisch oder in einem neutralen Datenformat, das Objektorientierung ermöglicht, zur Verfügung gestellt werden und müssen manuell importiert werden. Auch hier muss das Simulationsmodell mit viel manuellem Aufwand von Experten aufgebaut werden.

Gegen Ende des Anlagenentstehungsprozesses erfolgt die virtuelle Inbetriebnahme (VIBN), welche mit verschiedenen Tools durchgeführt werden kann. Dazu zählen z. B. WinMod, fee.screen, etc.. Jedes dieser Tools stellt einen Konsumenten der gesamten Daten und Informationen, die in den vorhergehenden Prozessschritten entstanden sind, dar. Für die Durchführung der virtuellen Inbetriebnahme werden Layout- und

Gebäudeinformationen, die mechanische Konstruktion inkl. Kinematik, die elektrische Konstruktion, das Steuerungsprogramm sowie Verhaltensmodelle der Anlage und Testdaten benötigt. Wie bereits an den vorherigen Schnittstellen beschrieben, können die meisten dieser Informationen nicht automatisch in das VIBN-Modell importiert werden, sondern müssen manuell eingefügt oder parametrisiert werden, wodurch auch im Kontext der VIBN nicht von einer Datendurchgängigkeit gesprochen werden kann.

An der Übergabe zwischen Planung und Betrieb werden alle relevanten Daten und Informationen aus den Planungstools übergeben. Die Haltung dieser Informationen erfolgt überwiegend in SAP. Auch an dieser Stelle beherrschen Datenbrüche und manuelle Übergaben die Schnittstelle und erzeugen somit viel Aufwand. Eine genaue Betrachtung der Details zur Übergabe der Planungsdaten an den Betrieb wird aktuell von [209] durchgeführt.

#### 6.4 Ableitung von Optimierungspotentialen

Die bisher in Kapitel 6 beschriebenen Prozesse, Tools und Daten weisen, wie in den vorangegangenen Unterkapiteln beleuchtet, zahlreiche Brüche auf. Um die Zielsetzung eines integrierten und durchgängigen Engineerings zu erreichen, wurden von Tauchnitz [180] drei Kriterien beschrieben, die auch in den in Kapitel 6.1.2 identifizierten Zielsätzen wiederzufinden sind und bei der Beantwortung von RQ2 helfen:

- Verwendung eines zusammenhängenden Engineering-Tool-Systems über die gesamte Planungs- und in der Betriebsphase.
- Einmalige Eingabe und zentrale Verwaltung aller Daten.
- Konsistente Haltung aller Daten durch das Tool-System während des gesamten Anlagen-Lebenszyklus.

Bezugnehmen auf diese Kriterien und den beschriebenen Status quo, kann [178] wie folgt sehr treffend zitiert werden:

*„Es ist ernüchtert festzuhalten: Aktuell gibt es keine Engineering-Tools oder -Systeme, die diese Anforderungen erfüllen. Es ist auch nicht zu erwarten, dass je ein solches*

*Werkzeug entwickelt wird, das für alle Gewerke, für alle Anlagen–Lebensphasen alle Aufgaben vollständig und gut anbietet. Dies wäre eine „eierlegende Wollmilchsau“, die unmöglich in all den vielen speziellen Fachaufgaben optimale Funktionalität anbieten kann. So bleibt nur die Alternative, die verschiedenen Engineering–Inseln durch Schnittstellen miteinander zu verbinden.“ [178]*

Seit der Entstehung dieses Zitats (2017) ist die Notwendigkeit nach einer Lösung für durchgängiges, digitales Engineering in der Industrie stetig weitergewachsen. Durch diesen Bedarf nahmen sowohl die Weiterentwicklung der Tools selbst als auch die Entwicklung von Schnittstellen zwischen den gängigen Tools im Engineering Fahrt auf und können heute schon an einigen Stellen (vgl. Kapitel 6.3) genutzt werden. Jedoch kann festgehalten werden, dass es für den in dieser Arbeit betrachteten OEM weiterhin noch nicht möglich ist, mit den heute vorhandenen Tools und deren Schnittstellen reales durchgängiges und digitales Engineering über den gesamten Anlagenentstehungsprozess zu betreiben. Dies liegt nicht allein an den technischen Möglichkeiten und Schnittstellen der Tools oder an den Daten, sondern auch an organisatorischen und prozessualen Hürden, wie die Ergebnisse der Prozessanalyse (vgl. Kapitel 6.1.2) zeigen. Die drei oben genannten Kriterien von Tauchnitz [178] sowie die vier „Muda“-Kategorien und die Zielsätze aus der Prozessanalyse belegen dies deutlich. Diese Erkenntnis unterstützt die in der vorliegenden Arbeit vorgeschlagene dreidimensionale Transformationsstrategie, welche sich auf die Dimensionen Prozess, Technik und Organisation fokussiert.

Abgeleitet von diesem Fazit aus den in Kapitel 6 dargelegten Zusammenhängen, können folgende Optimierungspotenziale festgehalten werden:

<b>Prozess</b>	Durchgängige Definition und Nutzung von einheitlichen Standards im Anlagenentstehungsprozess durch alle Beteiligten über alle Planungsdisziplinen und Gewerke hinweg (sowohl OEM als auch alle Auftragnehmer)
----------------	---

	Durchgängige Definition und Beachtung der Anforderungen an die Objektorientierung ab der frühen Phase im Anlagenentstehungsprozess
	Einheitliche Formulierung aller Anforderungen, Standards, Datenformate und Artefakte in den Ausschreibungsunterlagen
	Möglichkeit zur Nutzung von Betriebsdaten zur Planung von Neu-Anlagen
	Möglichkeit zur Nutzung von Erfahrung und Wissen aus vergangenen Projekten
<b>Technik</b>	Verfügbarkeit von standardisierten Schnittstellen zwischen den Tools mit der Möglichkeit zur Nutzung neutraler Datenaustauschformate
	Verfügbarkeit von Baukasten-Bibliotheken für jede Planungsdisziplin
	Etablierung eines "common data managements" als single source of truth für alle im Prozess entstehenden Metadaten (Datendrehscheibe)
	Verfügbarkeit einer Plattform für kollaboratives Arbeiten (inkl. 3D Visualisierung)
	Ausschließliche Verwendung von Tools, die die Objektorientierung unterstützen
	Möglichkeit der automatischen Modellgenerierung für sämtliche Simulationen im Anlagenentstehungsprozess bis hin zur virtuellen Inbetriebnahme

<b>Organisation</b>	Klare Verantwortlichkeiten entlang des Anlagenentstehungsprozesses (Daten-, Prozess-, Ergebnisverantwortung)
	Schärfung des Bewusstseins über die Notwendigkeit von Datendurchgängigkeit und Objektorientierung im Planungsprozess (von Management über Planer bis hin zur Instandhaltung)
	Verfügbarkeit von Schulungen und Qualifizierungsmaßnahmen zur Sicherstellung von ausreichendem Know-How der Mitarbeitenden
	Einführung neuer Personenrollen inklusive entsprechender Qualifizierungspfade.

*Tabelle 4: Optimierungspotenziale des Anlagenentstehungsprozesses in der Automobilindustrie*

## 7 Herleitung und Beschreibung des optimierten Anlagenentstehungsprozesses

Nachdem in dem vorhergehenden Kapitel detailliert der gelebte Prozess bei dem betrachteten OEM beschrieben wurde und die Optimierungspotenziale auf Basis einer durchgeführten Prozessanalyse identifiziert wurden, ist das Ziel dieses Kapitels, die Definition und Beschreibung des optimierten AEP. Die Optimierungen erfolgen auf Basis der bisherigen Erkenntnisse, der Prozessanalyse und der Experteninterviews. Außerdem werden in diesem Kapitel die notwendigen Toolketten und Datenmodelle beschrieben, sowie die Vorteile und Herausforderungen des optimierten AEPs beleuchtet.

### 7.1 Herleitung des optimierten Anlagenentstehungsprozesses auf Basis der Ergebnisse der Experteninterviews

Für den betrachteten OEM ist die Optimierung des aktuellen Anlagenentstehungsprozesses in Richtung durchgängigen digitalen Engineerings von großer Bedeutung, da die in Kapitel 2 beschriebenen Herausforderungen einen zunehmend schlanken und flexiblen Prozess für die Entstehung von Produktionssystemen erfordern. Für die Optimierung dieses Prozesses ist es sinnvoll, herauszufinden, wo aktuell die größten Probleme im Prozess liegen und anschließend an dieser Stelle anzusetzen und, wenn möglich, entsprechende Lösungen zu finden. In Kapitel 6.1.2 ist eine Übersicht, über die in den Experten Workshops identifizierten Probleme im heute gelebten Prozess, zu finden. Aus der Analyse ist zu entnehmen, dass häufig eine mangelnde Datenverfügbarkeit entlang des gesamten Prozesses sowie andere prozessuale Schwächen (z. B. Wartezeiten) und eine fehlende oder nicht gelebte Standardisierung das Problem sind. Außerdem stellen die zu verwendenden Tools die Planer häufig vor große Herausforderungen, da beispielsweise Mehrfach-Eingaben oder manuelle Nachträge von Daten notwendig sind. Auf Basis dieser Ergebnisse, wurden mit den Experten Umsetzungspfade abgeleitet, anhand derer die oben beschriebenen Probleme erheblich verbessert oder sogar gelöst werden können. Diese Umsetzungspfade können anhand der „Von-Zu-Logik“ beschrieben werden, was bedeutet, dass zuerst das heute vorliegende Problem bzw. Vorgehen inklusive

der dabei entstehenden Nachteile beschrieben wird und anschließend der jeweilige Prozessausschnitt im Zielbild mit den zugehörigen Potentialen dargestellt wird.

### **Umsetzungspfad 1 (U1):** Verwendung von Projektdatenrepositories in der frühen Planungsphase

Zu Beginn von neuen Planungsprojekten müssen zunächst die Projektprämissen gesammelt werden. Die geschieht aktuell meist analog und aus Basis persönlicher Erfahrung der Planer. Diese erfragen bei bekannten Ansprechpartnern jeweils die benötigten Informationen, z. B. Layout, Terminpläne, Gesetzesvorschriften, aber auch die internen Prämissen, wie notwendige Fahrwege der Logistik, die vorhandene Peripherie im Gebäude oder sämtliche Prozessinformationen und Produktausprägungen. Dabei erhalten die Planer die Informationen in unterschiedlicher Granularität und Detailtiefe, was die Konzeptgenauigkeit stark variieren lässt. Anschließend erstellen die Planer auf Basis der erhaltenen Informationen manuelle Konzeptskizzen für verschiedene Planungsvarianten der Anlage. Diese Varianten werden auf Basis der bekannten Informationen plausibilisiert und hinsichtlich Machbarkeit, Einhaltung vorhandener Standards, Kosten, Taktzeit, Erweiterbarkeit, Variantenflexibilität, Flächenverbrauch und weiterer Randbedingungen bewertet und verglichen. Diese Bewertungen geschehen heute auch alle manuell, da es keine Verknüpfungen zwischen Layout, Mengengerüst, Kostenmonitoring, Taktzeitdiagrammen etc. gibt. Für die Verwendung der entstandenen Daten und Informationen in folgenden Prozessschritten müssen diese manuell in die jeweiligen Systeme eingetragen werden. Die Nachteile dieser Vorgehensweise liegen auf der Hand. So sind viele Korrektur- und Abstimmungs Schleifen notwendig und Daten müssen mehrfach manuell eingepflegt werden, was im Planungsprozess viel Zeit kostet. Die Ungenauigkeit der Konzepte birgt Risiken hinsichtlich der Qualität des Planungsprozesses. Darüber hinaus ist eine übergreifende Standardisierung jeglicher Bestandteile des Planungsprozesses mit diesem Vorgehen kaum realisierbar.

Um diese Probleme zu lösen und so den Planungsprozess effizienter zu machen, wird folgender Umsetzungspfad vorgeschlagen. Durch eine entsprechende (Weiter-)

Entwicklung von Tools und/oder deren Verknüpfung können zu Beginn des Projekts die oben beschriebenen Projektprämissen von jedem Planer für die Bearbeitung seiner Aufgaben importiert werden. Dazu wird ein zentrales Projektdatenrepository mit allen notwendigen Daten befüllt und permanent aktuell gehalten, wodurch im Verlauf des Projekts ein zunehmender Detaillierungsgrad der Daten entsteht. Dieses Projektdatenrepository kann außerdem die Umsetzung der Objektorientierung im Planungsprozess unterstützen, da an einer zentralen Stelle eine automatisierte, eindeutige und durchgängige Benennung der Planungsobjekte überprüft oder umgesetzt werden kann. Durch klare Zuständigkeiten für die Pflege des Projektdatenrepositorys und fest definierte Freigabeprozesse wird zudem die Integrität der Planungsobjekte sichergestellt. Anhand der Verknüpfung der Planungssysteme sollen außerdem automatisch Workflows und Benachrichtigungen für die jeweiligen Fachstellen und Experten ausgelöst werden können, sodass keine Zeit durch analoge Abstimmung verloren wird. Auch die Plausibilisierung sowie der Vergleich der Planungsvarianten kann durch eine korrekte Verknüpfung verschiedener Planungstools dynamisch und automatisiert erfolgen. An dieser Stelle wird erneut deutlich, wie wichtig durchgängige Datennutzung, z. B. die Verknüpfung von Layout mit Taktzeitdiagramm, ist, da dies der zentrale Befähiger dieses Umsetzungspfades ist. Auch für die Zusammenarbeit mit externen Partnern im Anlagenentstehungsprozess birgt die durchgängige Datennutzung und Einführung eines zentralen Projektdatenrepositorys Potentiale, da die vorhandenen Daten und Informationen auch von diesem genutzt werden können und dieser so stets alle aktuellen Prämissen und Rahmenbedingungen kennt. So können unnötige Schleifen vermieden werden. Allgemein ergeben sich durch das beschriebene Vorgehen zahlreiche Potentiale. So kann der gesamte Prozess im besten Fall deutlich verkürzt werden, da Fehler, Doppelarbeit und Abstimmungsschleifen vermieden werden. Zudem wird der Standardisierungsgrad des Prozesses sowie der Planungsdaten erhöht.

#### **Umsetzungspfad 2 (U2): Durchgängige Objektorientierung der Layoutplanung**

Die Layoutplanung ist ein zentraler Punkt im gesamten Anlagenentstehungsprozess, da dies in einer sehr frühen Phase stattfindet und den Ursprung für das spätere Anlagenmodell darstellt. Die heute nicht vorhandene Objektorientierung in der



Layoutplanung führt dazu, dass die nachfolgenden Planungsdisziplinen häufig das Layout mehrfach nachzeichnen und in ihren Systemen nachziehen müssen. Dies und die Tatsache, dass die Gesamtverantwortung für das Layout nicht zentral festgelegt ist, bedingt, dass über den Planungsprozess hinweg meist keine Klarheit vorliegt, welches der aktuell gültige Planungsstand des Layouts ist und wo dieser abliegt. Dies kann so weit führen, dass Abweichungen zwischen Soll- und Ist erst bei Inbetriebnahme der Anlage durch manuelles Nachmessen auffallen. Aufgrund zahlreicher manueller Schritte im gesamten Layoutplanungsprozess, weist dieser eine sehr hohe Durchlaufzeit auf und ist zudem fehleranfällig. Außerdem verhindert die nicht vorhandene Objektorientierung in der Layoutplanung die Datendurchgängigkeit des gesamten Anlagenentstehungsprozesses.

Zukünftig soll durch die Verwendung geeigneter Layoutplanungstools in Verbindung mit weiteren Tools entlang des Prozesses die durchgängige, gemeinsame Nutzung objektorientierter Layouts möglich sein. So können alle beteiligten Planer mit einem gemeinsamen und dadurch immer aktuellen Layout arbeiten. Dabei ist das Ein- oder Ausblenden von Teil-Layouts je nach Interesse möglich und auch die Anzeige von Planungsvarianten oder dem Planungsverlauf über die Zeit ist vorhanden. Durch die Etablierung eines Gesamtverantwortlichen wird sichergestellt, dass es einen zentralen Ansprechpartner für den Fall von Konflikten oder anderen Fragestellungen gibt. Die Objektorientierung unterstützt zudem die Standardisierung der Daten und die Einhaltung des gemeinsamen Datenmodells, da jede Komponente, die im Layout hinzugefügt wird, automatisch die korrekte eindeutige Bezeichnung zugewiesen bekommt. Die Umsetzung der Objektorientierung in der Layoutplanung bringt einige Vorteile, darunter den Entfall manuellen Nachzeichnens und somit eine Zeitersparnis und die generelle Qualitätsverbesserung, da alle Planer mit denselben Daten arbeiten und so Fehler vermieden werden.

### **Umsetzungspfad 3 (U3): Etablierung einer kollaborativen Planungsumgebung**

Aufgrund fehlender technischer Möglichkeiten und nicht etablierter Datendurchgängigkeit, erfolgt die Arbeit entlang des Planungsprozesses auf mehreren Parallelpfaden, wobei aus verschiedenen Systemen jeweils Kopien

verschiedener Daten (z. B. Produktdaten, CAD-Modelle der Anlage, Anlagendokumentation, Layouts, Gebäudepläne, etc.) exportiert werden, an denen wiederum weitergearbeitet wird und diese dann wieder in die jeweiligen Systeme zurück importiert werden. Diese Parallelpfade werden sowohl intern (OEM) als auch extern (SE-Partner) verfolgt und die Ergebnisse dieser werden zu Abstimmungen zwischen den Beteiligten verwendet. Dieses Vorgehen birgt Risiken und kostet Zeit, da der Prozess an sich dadurch fehleranfällig wird, Dateninkonsistenzen entstehen oder systemtechnische Probleme den Import/Export verhindern.

Zukünftig kann dieses Problem durch die Etablierung einer kollaborativen Planungsumgebung mit entsprechender Datendrehscheibe gelöst werden. Die Datendrehscheibe stellt dabei den „Single Point of Access“ dar und fungiert als zentraler Datenverteiler, wobei die Originaldaten (inkl. Versionen, Varianten und Status) weiterhin in den Autorensystemen verbleiben, diese aber so konsumierbar gemacht werden. Ein Bearbeiten der Daten ist nur mit entsprechender Berechtigung möglich und durch Mechanismen in den Autorensystemen muss sichergestellt werden, dass durch paralleles Bearbeiten keine Konflikte entstehen. Die Daten können über die Datendrehscheibe zudem mit Workflow-Items versehen werden, sodass automatische Workflows inkl. Benachrichtigungen, wie in Umsetzungspfad 1 beschrieben, unterstützt werden. Die kollaborative Planungsumgebung besteht zudem aus einer 3D-Visualisierung, die dazu dient, gemeinsam Konzepte und Simulationen zu visualisieren und ggf. zu validieren. Durch dieses simultane und synchrone Arbeiten entlang des Planungsprozesses kann die Qualität insgesamt deutlich verbessert werden, die Durchlaufzeit gesenkt werden und Kosten für Änderungsschleifen reduziert werden. Dieses Vorgehen setzt Datendurchgängigkeit und Objektorientierung voraus und ist ein zentraler Befähiger für durchgängiges, digitales Engineering über Unternehmensgrenzen hinweg.

**Umsetzungspfad 4 (U4):** Automatische Modellgenerierung für Simulationen entlang des Anlagenentstehungsprozesses

Wie bereits in Kapitel 6.2 beschrieben, werden die Modelle für Simulationen heute meist manuell mit Daten aus verschiedenen Quellen aufgebaut. Besonders das Modell

für die virtuelle Inbetriebnahme muss mit viel Aufwand aus Planungsdaten, Layout, Geometrie, Elektrokonstruktion, SPS- Programm und Verhaltensmodellen zusammengebaut werden. Zudem müssen manuell Testfälle definiert und dazu Testdaten generiert werden, anhand derer die virtuelle Inbetriebnahme durchgeführt wird. Der Aufbau dieses Modells wird zusätzlich dadurch erschwert, dass heute keine durchgängig einheitliche Benamung der Anlagenkomponenten, begonnen beim Layout, existiert, sodass alle Verknüpfungen manuell hergestellt werden müssen. Der Modellaufbau für Simulationen entlang des Anlagenentstehungsprozesses ist demnach heute mit sehr viel Aufwand verbunden und ist zudem fehleranfällig.

Zukünftig soll zum Einen die Modellgenerierung für die Simulationen ein fester Bestandteil des Projektplans werden und deutlich früher im Prozess stattfinden als heute, sodass eine iterative Simulation entlang des Anlagenentstehungsprozesses möglich ist und die Ergebnisse dieser Simulationen dynamisch für die Entwicklung verwendet werden können. Zudem soll die Modellgenerierung zunehmend automatisiert werden, indem alle Komponenten der Anlage aus einer zentralen Bibliothek importiert werden können. Dies bedingt außerdem eine einheitliche Benamung aller Komponenten entsprechend eines Gesamtdatenmodells, sodass eine automatische Verortung aller Komponenten möglich ist. Durch eine Verknüpfung der Planungssysteme mit der in Umsetzungspfad 3 beschriebenen kollaborativen Planungsumgebung können alle Änderungen aus den Planungssystemen automatisiert in das Simulationsmodell eingespielt werden. Außerdem können die Ergebnisse aus den Simulationen in die jeweiligen Planungssysteme zurückgespielt und für die weitere Entwicklung verwendet werden. Eine automatische Modellgenerierung für die virtuelle Inbetriebnahme kann so in drei Stufen erfolgen. Zuerst wird das virtuelle 3D-Modell der Anlage (Geometriedaten und Bewegungsdaten) automatisch erstellt, dann wird der Materialfluss sowie die Steuerungstechnik und das Geräteverhalten (SPS) importiert und auf Basis dieser Daten wird eine Testliste inkl. Testdaten automatisch und auf Basis von Standards erstellt, anhand derer die virtuelle Inbetriebnahme durchgeführt wird. Durch dieses Vorgehen, welches ebenfalls nur durch vollständige Datendurchgängigkeit umgesetzt werden kann, können laut der Expertenschätzung bis zu 80% des heutigen Aufwands für die virtuelle Inbetriebnahme eingespart werden. Außerdem wird die

Fehleranfälligkeit deutlich gesenkt und die Möglichkeiten der simulierbaren Szenarien deutlich erhöht.

#### **Umsetzungspfad 5 (U5):** Einheitliches Datenmodell entlang des gesamten Prozesses

Als letzten Umsetzungspfad empfiehlt sich die Etablierung eines einheitlichen Datenmodells entlang des gesamten Anlagenentstehungsprozesses unter Einbeziehung sowohl intern als auch extern durchgeführter Prozessschritte. Dieser Umsetzungspfad stellt einen zentralen Befähiger für die Datendurchgängigkeit im Engineering dar und adressiert die Schnittstellenprobleme, die heute an den Übergängen zwischen den Planungsdisziplinen vorliegen. Aktuell scheitert die Etablierung eines einheitlichen Datenmodells in erster Linie an nicht vorhandenen übergreifenden Benamungsstandards für die im Engineering entstehenden Objekte. Bei dem betrachteten OEM existieren je Planungsdisziplin Namenskonventionen, die im Rahmen der Beauftragung an den Lieferanten übergeben werden. Diese Namenskonventionen unterscheiden sich teilweise in ihren Anforderungen und geben unterschiedliche Standards vor. Die Attribute sowie deren Bezeichnung, die für das jeweilige Objekt relevant sind, werden oft gar nicht vorgegeben, sondern von den verantwortlichen Planern oder Lieferanten definiert. Dies führt dazu, dass für Simulationen nicht alle Daten und Informationen automatisch vorliegen oder nutzbar sind, sondern manuell nachgetragen oder gemappt werden müssen. Selbst bei Verwendung von Bibliotheken in der frühen Phase der Planung kann es vorkommen, dass verschiedene Bibliotheken unterschiedliche Benamungskonzepte verwenden und unterschiedliche Attribute zu den Objekten vorhalten.

Um die Etablierung eines einheitlichen Datenmodells zukünftig zu realisieren, ist zu Beginn die Vereinheitlichung der Benamungskonzepte über die verschiedenen Planungsdisziplinen notwendig. Außerdem muss die Einhaltung der vorgegebenen Anforderungen systemtechnisch überprüfbar werden, sodass eine Nicht-Einhaltung der Standards nicht mehr möglich ist. Bei Verwendung von Bibliotheken müssen diese ebenfalls hinsichtlich der Benamung von Objekten und den zugehörigen Attributen vereinheitlicht werden. Die Auswahl der notwendigen Attribute muss gemeinsam mit den Experten der verschiedenen Simulationsarten erfolgen, da eine automatische

Generierung von Simulationsmodellen nur möglich ist, wenn alle notwendigen Attribute direkt aus den Autorensystemen importiert werden können. Darauf aufbauend kann ein übergreifend verwendbares Datenmodell entwickelt werden, welches alle Anforderungen aus den Planungsdisziplinen und den Simulationen erfüllt. Zur Operationalisierung dieses Datenmodells muss eine Organisationseinheit etabliert werden, welche stets die Anforderungen aus dem Engineering mit dem aktuellen Datenmodell abgleicht und dieses ggf. anpasst. Die Potenziale dieses Umsetzungspfades sind weitreichend, beziehen sich aber in erster Linie auf die Reduzierung von Änderungsschleifen, von manuellem Aufwand und der Erhöhung der Planungsqualität.

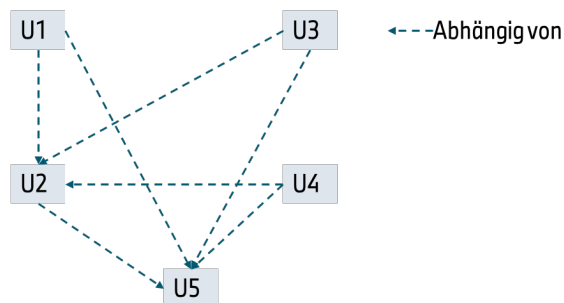


Abbildung 41: Abhängigkeiten zwischen den Umsetzungspfaden (U1– U5)

In Abbildung 41 sind zudem die Abhängigkeiten zwischen den fünf Umsetzungspfaden dargestellt. Daraus kann abgeleitet werden, dass die Umsetzung von U1, U3 und U4 von der Umsetzung von U2 und U5 abhängig ist. Dieser Zusammenhang bedeutet, dass die Einführung von Objektorientierung in der Layoutplanung und die Definition eines Datenmodells als zentrale Befähiger für ein Produktdatenrepository, eine kollaborative Umgebung sowie die automatische Modellgenerierung sind und demnach priorisiert werden sollten. Eine Darstellung der Einzelmaßnahmen innerhalb der Umsetzungspfade ist in Tabelle 5 dargestellt.

Nachdem nun ein Verständnis für die identifizierten Umsetzungspfade in Richtung durchgängigen digitalen Engineerings geschaffen wurde, wird im Folgenden anhand Tabelle 5 die Frage beantwortet, welche technischen, organisatorischen und prozessualen Maßnahmen nötig sind, um die Umsetzungspfade zu realisieren.

	<b>technische Maßnahmen</b>	<b>prozessuale Maßnahmen</b>	<b>organisatorische Maßnahmen</b>
<b>Umsetzungspfad 1</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Weiterentwicklung der Planungstools, sodass die Verwendung von Produktdatenrepositories möglich ist</li> <li>- Entwicklung von Schnittstellen zwischen den Planungstools</li> <li>- Etablierung eines zentralen Produktdatenrepository und Anbindung an die Planungstools</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Einhaltung einheitlicher Namenskonventionen und -Standards im Engineering</li> <li>- Objektorientierung entlang des Prozesses leben</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Festlegen der Datenverantwortung für das Produktdatenrepository</li> <li>- Definition von Freigabeprozessen für die Daten in den Produktdatenrepositories</li> <li>- Einbeziehung der Lieferanten bei Vorgabe der Produktdatenrepositories und Verpflichtung zur Nutzung</li> </ul>
<b>Umsetzungspfad 2</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Objektorientierung in den Planungstools muss sichergestellt sein</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Einhaltung einheitlicher Namenskonventionen und -Standards im Engineering</li> <li>- Objektorientierung entlang des Prozesses leben</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Festlegen der Datenverantwortung je Planungsdisziplin</li> <li>- Bewusstsein schaffen für Objektorientierung entlang des Prozesses</li> </ul>
<b>Umsetzungspfad 3</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- technische Umsetzung der Kollaborationsplattform bestehend aus einer Visualisierungsumgebung und einer Datenplattform</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Etablierung von Synchronpunkten im Prozess zur gemeinsamen Validierung von Planungsständen oder -varianten in der Kollaborationsplattform</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Entwicklung von Experten (durch Weiterbildung) für die Kollaborationsplattform</li> <li>- Definition der Datenverantwortung</li> </ul>
<b>Umsetzungspfad 4</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- technische Befähigung zur Automatisierung der Modellgenerierung durch Weiterentwicklung der Simulations- und Planungstools bzw. deren Schnittstellen</li> <li>- Etablierung einer zentralen Bibliothek</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modellgenerierung als festen Prozessbestandteil etablieren und mit Meilenstein versehen</li> <li>- Frühere Verankerung der Simulationen im Prozess</li> <li>- Einhaltung einheitlicher Namenskonventionen und -Standards im Engineering</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Qualifizierung der am Prozess beteiligten Planer zur effektiveren Nutzung der Simulationen</li> </ul>
<b>Umsetzungspfad 5</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementierung einer systemseitigen Überprüfung der Einhaltung von Namenskonventionen in die Planungstools</li> <li>- Vereinheitlichung der Standards über die verschiedenen Bibliotheken hinweg oder Definition von Mappingregeln</li> <li>- Planungstools unterstützen das einheitliche Datenmodell (Import und Export)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disziplinübergreifende Festlegung des einheitlichen Datenmodells sowie der zugehörigen Attribute</li> <li>- Einhaltung einheitlicher Namenskonventionen und -Standards im Engineering</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Etablierung einer Organisationseinheit zur Verwaltung und Verantwortung des Datenmodells</li> </ul>

*Tabelle 5: Maßnahmen zur Realisierung der Umsetzungspfade*

Die Optimierungspotenziale aus Kapitel 6.4 spiegeln sich größtenteils in den identifizierten Maßnahmen zur Realisierung der Umsetzungspfade aus diesem Kapitel. Die Relation der Optimierungspotenziale zu den hier beschriebenen Maßnahmen ist in Abbildung 42 dargestellt.

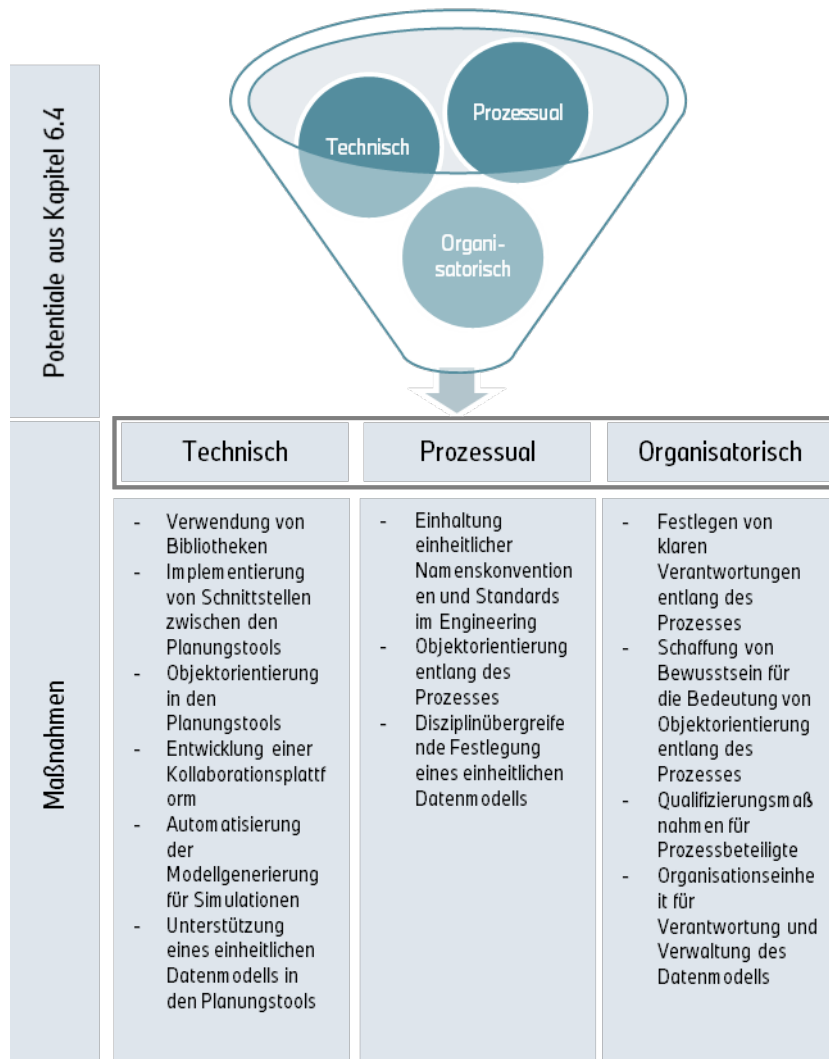


Abbildung 42: Relation zwischen Optimierungspotenzialen und Maßnahmen

Anhand dieses Vergleichs kann festgehalten werden, dass fast alle Maßnahmen einem oder mehreren der definierten Optimierungspotenziale zugeordnet werden können. Lediglich die beiden folgenden Optimierungspotenziale bleiben durch die Maßnahmen unbesetzt:

- Möglichkeit zur Nutzung von Betriebsdaten zur Planung von Neu-Anlagen

- Möglichkeit zur Nutzung von Erfahrung und Wissen aus vergangenen Projekten

Es ist naheliegend, dass diese beiden Potentiale aktuell nicht durch gezielte Maßnahmen adressierbar sind, da hier die Verbindung zwischen Planung und Betrieb vollständig auf Datenebene umgesetzt sein muss, was heute in den meisten Betrieben aufgrund technischer, prozessualer und organisatorischer Hürden noch in ferner Zukunft liegt. Diese beiden Punkte bleiben demnach für die vorliegende Arbeit offen und stellen einen wichtigen Ansatz für zukünftige Forschung dar.

Im folgenden Kapitel wird einer der zentralen Bausteine sowohl der Optimierungspotentiale als auch der Maßnahmen beschrieben: Das einheitliche Datenmodell, welches die Datendurchgängigkeit entlang des Anlagenentstehungsprozesses unterstützen soll.

## 7.2 Zugrundeliegendes Meta-Datenmodell des durchgängigen Engineerings

Das im Folgenden beschriebene Datenmodell befindet sich aktuell bei dem betrachteten OEM für die Realisierung durchgängigen Anlagen-Engineerings sowie der Objektorientierung in Erprobung. Für die Entwicklung dieses Modells wurden das im Rahmen von AutomationML verwendete Datenformat CAEX (vgl. Kapitel 2.2.2) sowie ein unternehmensspezifisches Bezeichnungskonzept (Masterstring) herangezogen.

Das Format CAEX für die Abbildung der Topologie und der Elemente eines Produktionssystems beinhaltet verschiedene Modellierungsmittel. In [210] werden diese Modellierungsmittel und Semantiken ausführlich beschrieben. Eine Zusammenfassung der Modellierungsmittel auf Basis der in [210] beschriebenen Erläuterungen mit den für die vorliegende Arbeit relevanten Beschreibungen ist in Tabelle 6 dargestellt.



Modellierungsmittel	Originalbezeichnung	Beschreibung	Beispiel
Rollenklassen	role class	Beschreibung der abstrakten Funktion eines Systemelements. Jede Rolle kann Attribute und Interfaces enthalten.	Klasse: "MechanicalPart" oder Klasse "Device" als Semantik von Strukturelementen.
Interfaceklassen	interface classes	Beschreibung des Endpunkts einer abstrakten Relation zwischen Elementen oder Referenz auf Informationen außerhalb CAEX-Modellierung. Jedes Interface kann Attribute enthalten, welche in jeder Instanz der Interfaceklasse mit Werten gefüllt werden sollen.	Referenz auf 3D-Geometrie oder Verhaltensmodell.
System Unit Klassen	systemunitclasses	Wiederverwendbare Systemkomponenten. Alle beschriebenen Modellierungskonzepte können Attribute besitzen.	Herstellerkatalog für Geräte oder Bauelemente.
Instanz Hierarchie	instance-Hierarchy	Beinhaltet hierarchisch strukturierte Internal Elements. Diese repräsentieren die jeweilige Objektinstanz im Produktionssystem.	In Abhängigkeit des Abstraktionsniveaus: Abbildung der gesamten Anlage, funktionaler Einheiten (z.B. Maschinen), Geräte (z.B. Motoren), mechanischer Komponenten (z.B. Kabel), logischer Komponenten (z.B. SPS Programme).

*Tabelle 6: AML-Modellierungswerkzeuge*

Um die im Verlauf der vorliegenden Arbeit als zentralen Befähiger für durchgängiges digitales Engineering identifizierte Objektorientierung umzusetzen, ist ein zentrales Metadatenmodell in Form einer Referenzarchitektur (vgl. [211]) notwendig. Dieses Metadatenmodell ist disziplin-, gewerke- und technologieunabhängig und wird entlang des Anlagenentstehungsprozesses immer weiter angereichert, was bedeutet, dass in der frühen Phase zuerst nur der oberste Knoten mit Werten belegt ist und am Ende des Anlagenentstehungsprozess erst das komplette Metadatenmodell der konkreten Instanz befüllt ist. Das in Abbildung 43 dargestellte Metadatenmodell wurde im Rahmen eines Projektes bei dem betrachteten OEM gemeinsam mit Experten entwickelt [212] und wird gerade aktiv verprobt, sodass der hier dargestellte Stand bereits einer iterativ verifizierten Version entspricht. Eine detaillierte Beschreibung

der einzelnen Knoten ist Tabelle 7 zu entnehmen. Die Zuordnung der Knoten und Kanten zu AutomationML bzw. CAEX-Elementen ist ebenfalls in Abbildung 43 dargestellt. Ergänzend dazu kann erwähnt werden, dass Attribute zu den Knoten auf jeder Ebene verknüpft werden können.

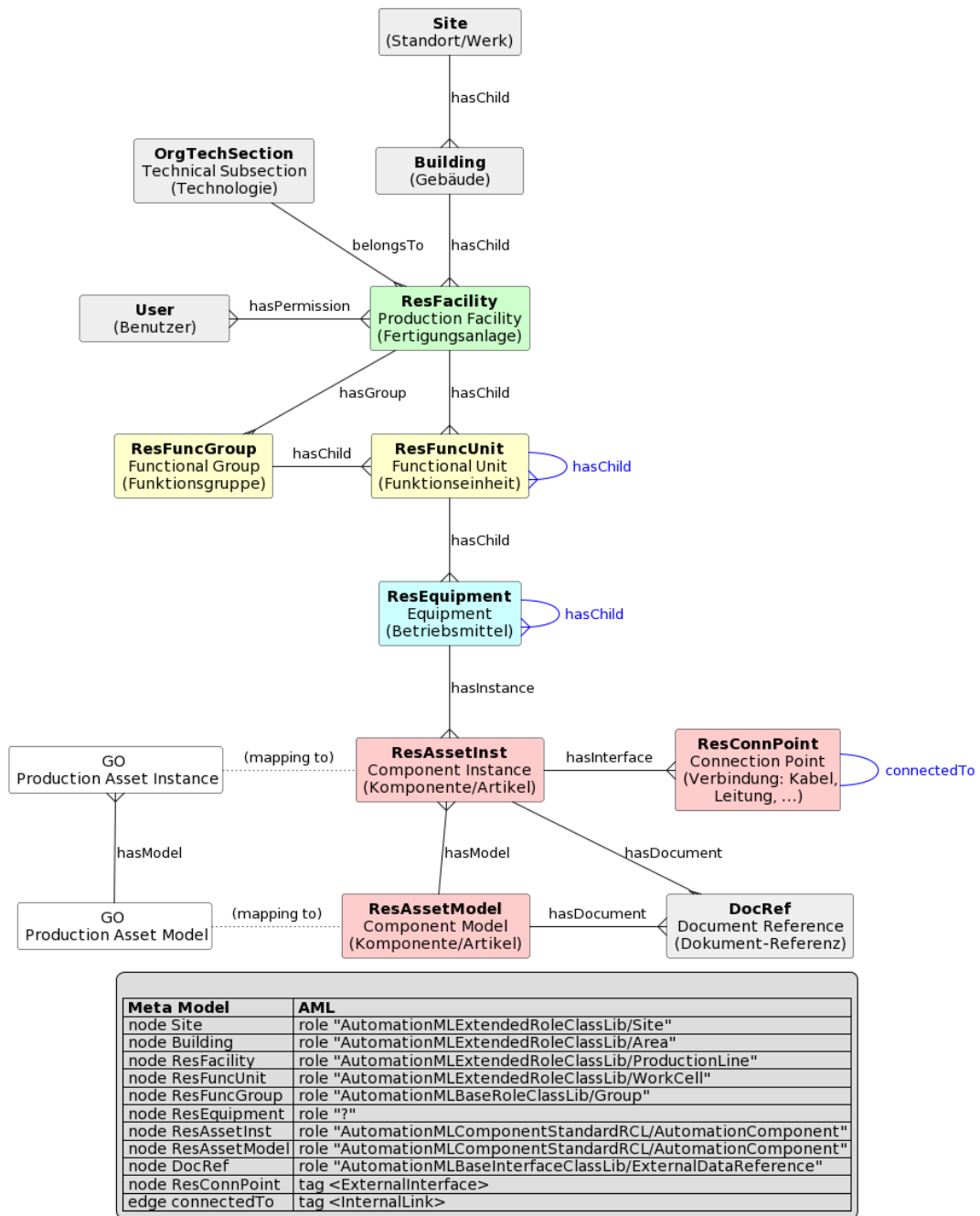


Abbildung 43: Metadatenmodell [212]

Knoten	Beschreibung	Beispiel
Site	Standort, Werk	Regensburg
Building	Gebäude	Gebäudenummer, z.B. 0590
OrgTechSection	Technologie	Montage
ResFacility	Fertigungsanlage	Bezeichnung der Produktionsanlage
User	Benutzer	Personennamen
ResFuncUnit	Funktionseinheit	Takt
ResFuncGroup	Funktionsgruppe	Bandabschnitt
ResEquipment	Betriebsmittel	
ResAssetInst	Komponente, Artikel	Z.B. Greifer
ResConnPoint	Verbindung	Kabel, Leitung
ResAssetModel	Model der Komponente, des Artikels	Z.B. Beschreibung des Greifers
GO Production Asset Instance	Geschäftsobjekt	
GO Production Asset Model	Geschäftsobjekt	
DocRef	Dokumenten Referenz	Referenz auf 3D- Modell oder Verhaltensmodelle

*Tabelle 7: Detaillierung Metadatenmodell*

Das in diesem Kapitel beschriebene Metadatenmodell wird als Referenzarchitektur für den weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit zugrunde gelegt.

### 7.3 Workflowmodellierung und Beschreibung der Toolketten des definierten SOLL-Anlagenentstehungsprozesses

Unter Einbeziehung der in Kapitel 6.4 identifizierten Optimierungspotenziale sowie der in Kapitel 7.1 beschriebenen Umsetzungspfade kann ein Soll-Modell des Anlagenentstehungsprozesses definiert werden, welches im Folgenden beschrieben wird und in Abbildung 44 dargestellt ist. Die Modellierung des Soll-Prozesses wird zudem flankiert von einer SIPOC-Analyse, welche in Anhang A detailliert dargestellt ist. Ergänzend zum Prozessmodell wird im weiteren Verlauf dieses Kapitels außerdem die zur Realisierung dieses Modells benötigte Toolkette unter Beachtung des in Kapitel 7.2 definierten Meta-Datenmodells beleuchtet.

In einem optimierten Anlagenentstehungsprozess wird der Startpunkt des eigentlichen Workflows dadurch beschrieben, dass durch das Fahrzeugprojektteam eine Information an die verantwortliche Planungsorganisationseinheit erfolgt. Diese Information umfasst eine konkrete Formulierung des Bedarfs nach einer neuen Anlage sowie einen Katalog bereits bekannter Anforderungen an das Produktionssystem durch das Fahrzeugprojekt und einen groben Zeitplan, welcher an den Zeitplan des Fahrzeugprojekts angelehnt ist. Bei der Benachrichtigung der Anlagenplaner ist zu beachten, dass dies im besten Fall so früh wie möglich stattfindet, sodass die aktive Planung bereits früher ansetzen kann als bisher. Nachfolgend müssen technische Standards und Standard-Bibliotheken je Planungsdisziplin bereitgestellt bzw. vorgegeben werden. Dieser Schritt ist teilweise bereits im aktuell gelebten Prozess enthalten, jedoch wird dabei häufig nur die Layoutplanung abgedeckt. So früh wie möglich müssen durch Fachteams aller Disziplinen die technischen Standards, Vorgaben zum Bezeichnungskonzept sowie die zu verwendenden Standard-Bibliotheken definiert und zur Verfügung gestellt werden, sodass ein durchgängig hoher Standardisierungsgrad von Anfang an sichergestellt wird und eine Objektorientierung unumgänglich umgesetzt wird. Diese Prozessoptimierung basiert auf Umsetzungspfad 1 (vgl. Kapitel 7.1).

Kurz darauf wird durch das Fahrzeugprojektteam ein aktuelles Modell des virtuellen Produkts (Fahrzeug) bereitgestellt. Dieses Modell enthält nicht nur die 3D-Daten des Produkts, sondern auch alle relevanten und zu diesem Zeitpunkt bekannten Metadaten (z.B. Gewicht, Maße, Anforderungen an Materialeigenschaften, etc.). Ab diesem Zeitpunkt muss stets die aktuelle Version des Modells zur Verfügung stehen. Bei signifikanten Änderungen muss die Anlagenplanung jedoch zusätzlich aktiv informiert werden, sodass Machbarkeitsstudien und Simulationen durchgeführt werden können. Auf Basis dessen wird der konkrete Anforderungskatalog an die Anlagenplanung abgeleitet. Darauffolgend wird das virtuelle Werkslayout bereitgestellt, welches Grob- und Feinlayout ersetzt. Das virtuelle und objektorientierte Werkslayout (inkl. Metadaten, wie verfügbarer Platz, Hallenhöhe, Traglast des Bodens, etc.) steht allen am Prozess beteiligten Planern in der kollaborativen 3D-Umgebung zur Verfügung und ist stets mit einem Status (z.B. „Entwurf“ oder „Final“) gekennzeichnet, sodass maximale Transparenz über den

Fortschritt der Layoutplanung existiert, wie in Umsetzungspfad 2 und 3 (vgl. Kapitel 7.1) beschrieben ist. Dieser Schritt ist eine maßgebliche Veränderung zum Ist-Prozess, da in der Layoutplanung der Grundstein für viele weitere Planungsaktivitäten liegt und aktuell große Probleme damit einhergehen (vgl. Kapitel 7.1.2).

Da zu diesem Zeitpunkt im Prozess bereits ausreichend Informationen vorliegen, kann die Entscheidung getroffen werden, ob die Anlage von Grund auf neu entwickelt wird oder ob auf eine Referenzanlage zurückgegriffen werden kann. Nach Analyse des Anforderungskatalogs und Transparenz über Layout-Bedingungen (z.B. verfügbarer Platz, Hallenhöhe, Traglast des Bodens, ...) können bestehende Produktionssysteme nach möglichen Referenzanlagen untersucht werden. Falls eine passende Anlage (ganz oder in Teilen) vorhanden ist, wird aus Effizienz- und Standardisierungsgründen auf dieser aufgesetzt. Falls dies nicht möglich ist, muss eine komplette Neu-Anlage geplant und in Auftrag gegeben werden. Dieser Schritt findet im IST-Prozess nicht statt, ist aber ein wesentlicher Beitrag zur nachhaltigen Planung von Produktionssystemen (siehe Optimierungspotenzial aus Kapitel 7.4). Bei positiver Entscheidung für die Verwendung einer Referenzanlage (ganz oder in Teilen), kann diese inkl. aller ihrer Daten aus einer Bibliothek geladen werden und der Anlagenplanung sowie dem Lieferanten als Basis für alle Planungs- und Entwicklungsaktivitäten zur Verfügung gestellt werden. Bei negativer Entscheidung für die Verwendung einer Referenzanlage wird festgelegt, dass eine komplette Neu-Entwicklung stattfinden muss. In beiden Fällen müssen die Projekt- und Zeitpläne angepasst werden. Die Auswahl eines geeigneten Anlagenlieferanten hängt zudem maßgeblich von der Entscheidung für oder gegen eine Neuentwicklung ab.

Direkt im Anschluss erfolgt die automatische Generierung der Ablaufsimulation. Dieser Prozessschritt unterscheidet sich dahingehend zum heutigen Ablauf, dass die Simulation durch das Vorliegen aller Daten an einem zentralen Punkt (Umsetzungspfad 3, 4 und 5 befähigen dies) automatisch generiert werden kann. Dies leistet einen erheblichen Beitrag zur Effizienzsteigerung und Reduzierung der DLZ im Prozess. Die Ergebnisse der Simulation liegen als Bericht inkl. Verbesserungspotenzialen für Folgeprozessschritte vor. Die Ergebnisse dieser Ablaufsimulation werden im Anschluss ausgewertet, was ggf. in einer Anpassung der

Layoutplanung resultieren kann. Die Verbesserungspotenziale werden iterativ in die Layoutplanung übernommen und validiert. Die Betrachtung der Simulation und der Simulationsergebnisse erfolgen in der kollaborativen Umgebung (vgl. Umsetzungspfad 3 aus Kapitel 7.1).

Parallel dazu kann die Spezifikation und Parametrierung der IT-Leitsysteme erfolgen. Die Inhalte dieses Schritts bleiben nahezu identisch zum Ist-Prozess. Maßgeblich ist der Zeitpunkt der Durchführung, der im Soll-Prozess deutlich früher stattfindet. Voraussetzung ist, dass die benötigten Parameter früher definiert werden und die IT früher eingebunden wird. Das Vorziehen dieses Schritts ist notwendig, um während der Softwareprogrammierung der SPS bereits aussagekräftige und realitätsnahe Tests durchführen zu können. Dies leistet einen Beitrag zur besseren Absicherung des Prozesses und der Verkürzung der DLZ.

Weiterhin beginnt die mechanische Konstruktion, wobei die Inhalte nahezu identisch zum Ist-Prozess sind, außer dass der Schritt durch Vorziehen oder Einsparen von Vorgängern früher stattfinden kann. Außerdem können Bibliotheken verwendet werden, was die Effizienz und den Standardisierungsgrad steigert und die DLZ senkt. Dadurch können Umsetzungspfad 1 und 5 (vgl. Kapitel 7.1) realisiert werden. Den jeweiligen Stand der mechanischen Konstruktion können alle Beteiligten jederzeit in der Kollaborationsumgebung einsehen. Außerdem liegen alle Daten des angereicherten Anlagenmodells zentral in der Datendrehscheibe vor. Synchron dazu erfolgen die Elektroplanung sowie die Elektrokonstruktion, deren Inhalte ebenfalls nahezu identisch zum Ist-Prozess sind, außer dass der Schritt durch Vorziehen oder Einsparen von Vorgängern ebenfalls früher stattfinden kann. Auch in der Elektroplanung bzw. -konstruktion können Bibliotheken verwendet werden, was die Effizienz und den Standardisierungsgrad steigert und die DLZ senkt (siehe Umsetzungspfad 1 und 5 in Kapitel 7.1). Den jeweiligen Stand der Elektroplanung sowie der Elektrokonstruktion können alle Beteiligten jederzeit in der Kollaborationsumgebung einsehen. Außerdem liegen alle Daten des angereicherten Anlagenmodells stets in der Datendrehscheibe vor.

Eine weitere Art der Simulation, welche im Soll-Prozess in einer optimierten Form erfolgen kann, ist die Geometrie- und Prozesssimulation. Die automatische Modell-Generierung kann durch das Vorliegen aller Daten an einem zentralen Punkt (Datendrehscheibe) (Umsetzungspfad 3, 4 und 5 befähigen dies) erfolgen. Dies leistet einen erheblichen Beitrag zur Effizienzsteigerung und Reduzierung der DLZ im Prozess. Außerdem liegen die Ergebnisse der Simulation zentral für alle Stakeholder als Bericht inkl. Verbesserungspotenzialen vor. Diese Verbesserungspotenziale werden iterativ in die Anlagenplanung übernommen und validiert. Die Betrachtung der Simulation und der Simulationsergebnisse erfolgt in der kollaborativen Umgebung (siehe Umsetzungspfad 3 in Kapitel 7.1).

Die Inhalte der darauffolgenden Softwareprogrammierung, Gerätekonfiguration und Parametrierung sind nahezu identisch zum Ist-Prozess. Jedoch kann der Schritt durch Vorziehen oder Einsparen von Vorgängern früher stattfinden und durch die Verwendung von Bibliotheken bzw. Softwarebausteine kann die Effizienz sowie der Standardisierungsgrad gesteigert und die DLZ gesenkt werden (vgl. Umsetzungspfad 1 und 5 in Kapitel 7.1). Den jeweiligen Stand können alle Beteiligten jederzeit in der Kollaborationsumgebung einsehen. Außerdem liegen alle Daten des angereicherten Anlagenmodells in der Datendrehscheibe vor. Parallel wird die gesamte Software inkl. Parametrierung bereits entsprechend der Schnittstellenbeschreibungen der IT getestet, sodass am Ende dieses Schrittes eine fehlerfreie und funktionsfähige Software vorliegt.

Auch der Aufbau des virtuellen Modells kann durch Vorziehen oder Einsparen von Vorgängern früher stattfinden. Außerdem kann das virtuelle Modell nahezu automatisch generiert werden (Umsetzungspfad 3, 4 und 5 aus Kapitel 7.1), da alle Daten objektorientiert und in einem einheitlichen Datenmodell an einem zentralen Punkt (Datendrehscheibe) vorliegen.

Der gesamte Anlagenentstehungsprozess kann als Anreicherungsprozess des virtuellen Modells gesehen werden, daher beginnt dieser Schritt bereits mit Beginn der mechanischen Konstruktion, der Elektroplanung sowie der Softwareprogrammierung, welche im Soll-Prozess parallel stattfinden. Diese

Automatisierung und Parallelisierung leistet einen signifikanten Beitrag zur Effizienzsteigerung des Gesamt-Prozesses.

Für die Erstellung der Betriebs- und Wartungsanleitung ergeben sich im Soll-Prozess dadurch Verbesserungen, dass durch das Vorliegen aller Daten und Modelle an einem zentralen Ort (Umsetzungspfad 3 aus Kapitel 7.1), die Verwendung von Bibliotheken (Umsetzungspfad 1 aus Kapitel 7.1) und die Parallelisierung der Konstruktionsgewerke die Anleitungen bereits früher und teilweise automatisiert erstellt werden können. Dies leistet einen erheblichen Beitrag zur Effizienzsteigerung und Reduzierung der DLZ.

Die folgenden beiden Schritte beziehen sich auf eine weitere Form der Simulation, nämlich der virtuellen Inbetriebnahme. Durch das Vorliegen aller Daten, insbesondere des virtuellen Modells, an einem zentralen Punkt (Datendrehscheibe) (Umsetzungspfad 3, 4 und 5 aus Kapitel 7.1 befähigen dies) kann das VIBN-Modell automatisch generiert werden. Außerdem können Verhaltensmodelle und andere Daten aus Bibliotheken geladen werden (Umsetzungspfad 1 aus Kapitel 7.1). Durch diese Kombination kann ein erheblicher Beitrag zur Effizienzsteigerung und Reduzierung der DLZ im Prozess geleistet werden.

Die konkrete Durchführung der VIBN profitiert dadurch, dass die Simulation durch das Vorliegen aller Daten an einem zentralen Punkt (Datendrehscheibe) (Umsetzungspfad 3, 4 und 5 aus Kapitel 7.1 befähigen dies) automatisch generiert werden kann. Dies leistet nicht nur einen erheblichen Beitrag zur Effizienzsteigerung, sondern auch zur Steigerung der Simulationsqualität. Ergebnisse der Simulation liegen als Bericht inkl. Verbesserungspotenzialen vor, welche iterativ übernommen und validiert werden. Die Betrachtung der Simulation und der Simulationsergebnisse erfolgt in der kollaborativen Umgebung (vgl. Umsetzungspfad 3 aus Kapitel 7.1).

Mit dem letzten Schritt vor Übergabe der Anlage an den Betrieb erfolgt der Aufbau und die reale Inbetriebnahme. Die Inhalte dieser Schritte sind nahezu identisch zum Ist-Prozess, jedoch findet der Schritt durch Vorziehen oder Einsparen von Vorgängern deutlich früher statt. Außerdem läuft die Inbetriebnahme im Soll-Prozess durch umfangreiche Simulationen und Tests deutlich unkritischer ab. Mit diesem Schritt



erfolgt der Übergang der Verantwortung auf den Betrieb und der Anlagenentstehungsprozess ist abgeschlossen.

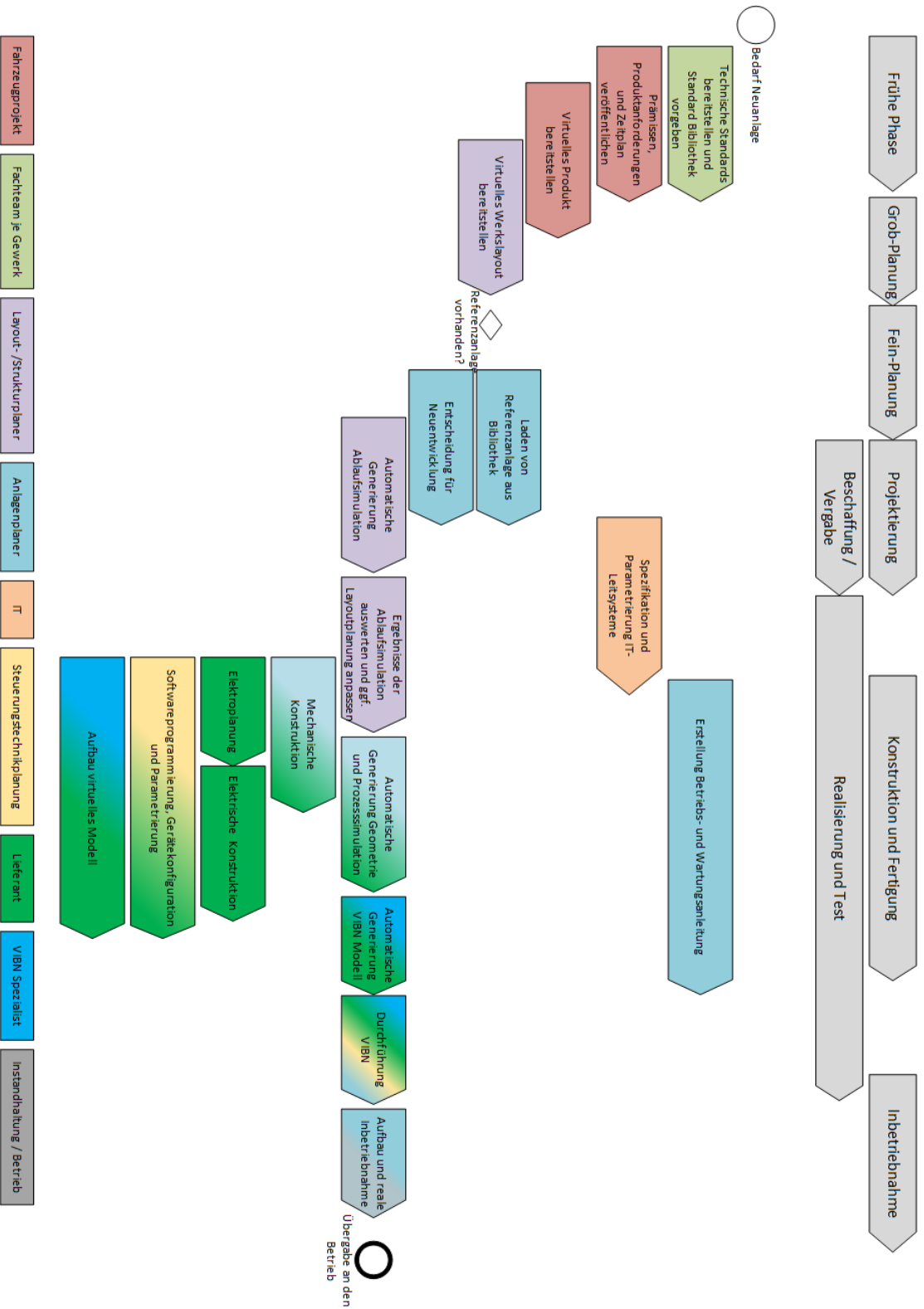


Abbildung 44: Soll-Modell Anlagenentstehungsprozess

Für die Umsetzung des soeben beschriebenen Soll-Prozesses ist die Verfügbarkeit einer entsprechenden Toolkette unerlässlich. Die Charakteristika dieser Toolkette werden im Folgenden dargelegt.

Die zentralen Bestandteile der Toolkette bilden die aktuell verwendeten Autorensysteme der jeweiligen Planungsdisziplinen, welche miteinander vernetzt werden. Diese Autorensysteme bleiben vorerst unverändert, da die Planer mit diesen Expertentools vertraut sind und alle benötigten Funktionen über Jahre hinweg optimiert wurden und weiterhin optimiert werden. Um trotzdem die Anforderungen des Soll-Prozesses erfüllen zu können, müssen diese Autorensysteme jedoch einige Prämissen erfüllen. Dazu zählen die Unterstützung der Objektorientierung (Umsetzungspfad 2 aus Kapitel 7.1), die Möglichkeit zur Anbindung von Bibliotheken (Umsetzungspfad 1), die Einhaltung von einheitlichen Datenmodellen (Umsetzungspfad 5 aus Kapitel 7.1) sowie die Möglichkeit zur Anbindung an eine zentrale Datendrehscheibe und damit die kollaborative Umgebung über eine Schnittstelle (Umsetzungspfad 3 aus Kapitel 7.1). Für den Fall, dass die jeweiligen Autorensysteme diese Anforderungen heute nicht erfüllen, müssen diese weiterentwickelt oder abgelöst werden. Dieser Aspekt muss im Rahmen einer technischen Migration detailliert untersucht werden.

Um die Anreicherung des virtuellen Modells entlang des Prozesses zu ermöglichen, indem die Autorensysteme sowie die Kollaborationsplattform an eine zentrale Datenquelle angebunden werden, ist die Einführung einer zentralen Datendrehscheibe (Umsetzungspfad 3 aus Kapitel 7.1) zwingend erforderlich. Diese Datendrehscheibe muss in der Lage sein, bidirektional mit allen Autorensystemen zu kommunizieren und die Metadaten anhand von Harmonisierungs- und Transformationsregeln in ein zusammenhängendes Gesamt-Datenmodell jedes Planungsobjekts zu integrieren. Daraus resultiert eine weitere Anforderung an die bestehenden Autorensysteme, die darin besteht, dass diese dazu fähig sind, über entsprechende Schnittstellen Daten an die Datendrehscheibe zu übergeben und auch Daten abzuholen.

Auch die verwendeten Simulationstools müssen in der Lage sein, anhand einer Schnittstelle zur Datendrehscheibe alle notwendigen Daten für die automatische Generierung der Simulationsmodelle (Umsetzungspfad 4 aus Kapitel 7.1) zu laden und damit ein Simulationsmodell aufzubauen. Außerdem müssen die Simulationssysteme die Modelle in die Datendrehscheibe zurückspielen können, sodass die Modelle sowie die Ergebnisse in der Kollaborationsumgebung betrachtet werden können. Auch an dieser Stelle gilt, dass die jeweiligen Simulationssysteme für den Fall, dass diese Anforderungen heute nicht erfüllt werden können, weiterentwickelt oder abgelöst werden müssen.

Entsprechend der beschriebenen Anforderungen und Charakteristika gleicht die Toolkette demnach mehr einem Netzwerk als einer tatsächlichen Kette (siehe Abbildung 45).

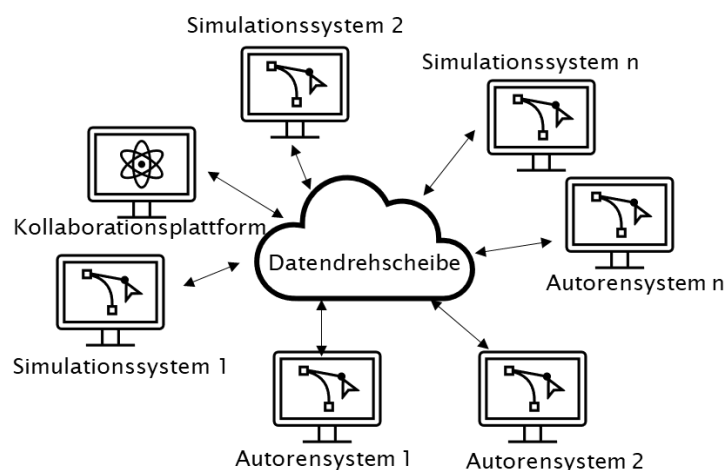


Abbildung 45: Toolkette im Soll-Prozess

Die beschriebene Toolkette kann nur funktionieren, wenn ein einheitliches und durchgängiges Metadatenmodell vorliegt und dieses auch von allen Tools in der Toolkette unterstützt wird. Das Metamodell aus Kapitel 7.2 erfüllt alle diese Anforderungen und sollte demnach als Grundlage für die Implementierung in die Toolkette dienen.

Zusammenfassend ist für die Realisierung des Soll-Prozesses zwingend erforderlich, dass die stringente Anreicherung des virtuellen Modells inkl. aller Metadaten entlang des kompletten Prozesses durch die Toolkette ermöglicht wird. Dazu müssen alle

Datenbrüche zwischen den Tools behoben werden und eine zentrale Verknüpfung der Daten ermöglicht werden.

#### 7.4 Abweichungsübersicht zwischen IST- und SOLL-Prozess

Der Vergleich des in Kapitel 6.2 beschriebenen Ist-Prozesses mit dem in Kapitel 7.3 definierten Soll-Prozess zeigt, dass folgende Effekte durch die Prozessoptimierung erreicht werden können: Höhere Prozessqualität, bessere Prozess-Absicherung, höherer Standardisierungsgrad, bessere Transparenz, Verkürzung der Gesamtdurchlaufzeit. Dabei ist zu betonen, dass die Verkürzung der Gesamt-DLZ als stärkster Effekt auftritt, welcher je nach Komplexität des Anlagenprojekts stärker oder schwächer ausfallen kann. **Error! Reference source not found.** zeigt eine Übersicht über alle Prozessänderungen sowie deren Gründe, Resultate und Befähiger-Umsetzungspfade. Die Prozessänderungen ohne direkten Bezug zu Umsetzungspfaden sind organisatorischer Natur und fließen im folgenden Kapitel bei der Ableitung der Transformationsstrategie aus Organisations-Sicht ein. An dieser Stelle ist es wichtig zu betonen, dass alle Änderungen im Prozess mit gezielten organisatorischen Maßnahmen, z.B. Qualifizierung der Mitarbeiter, Management-Unterstützung, Etablierung neuer Rollen, etc., begleitet werden müssen, um eine erfolgreiche Prozessoptimierung zu erreichen. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse aus Kapitel 7 und 8 die Basis für die Ableitung der konkreten Transformationsstrategie bilden. Die Prozessschritte werden zur Vereinfachung mit Kürzeln beschrieben, wobei „I“ für einen Prozessschritt aus dem Ist-Prozess steht und „S“ für einen aus dem Soll-Prozess. Die Zuordnung der Prozessschritte und deren Kürzeln ist in den Abbildungen in Anhang A und Anhang E ersichtlich.

Prozessschritt	Effekt	Grund	Befähiger-Umsetzungspfad	Resultat
I-11 -> S-5	Verkürzung	Durch die Verwendung von Bibliotheken und Standards kann die Softwareprogrammierung teil-automatisiert werden.	1, 5	Softwarequalität steigt, Verkürzung der Gesamt-DLZ

I-11 -> S-5	Vorziehen	Frontloading, da benötigte Parameter durch frühere Einbindung der AG-IT früher bekannt sind.	-	bessere Absicherung des Prozesses, Verkürzung der Gesamt-DLZ
I-10, I-14 -> S-15	Verkürzung	Durch die Verwendung von Bibliotheken und Standards kann die Parametrierung und Konfiguration teilautomatisiert werden.	1, 5	Softwarequalität steigt, Verkürzung der Gesamt-DLZ
I-10, I-14 -> S-15	Parallelisierung	Durch die frühere Verfügbarkeit der IT-Leitsysteme können Tests der Gerätekonfiguration parallel und teilautomatisiert stattfinden.	1, 4, 5	Softwarequalität steigt, bessere Absicherung des Prozesses, Verkürzung der Gesamt-DLZ
I-3 -> S-9, S-10	Verkürzung	Automatische Generierung der Simulation ist aufgrund Datendurchgängigkeit möglich.	3, 4, 5	Verkürzung der Gesamt-DLZ
I-12 -> S-11	Verkürzung	Automatische Generierung der Simulation ist aufgrund Datendurchgängigkeit möglich.	3, 4, 5	Verkürzung der Gesamt-DLZ
I-9 -> S-17, S-18	Verkürzung	Automatische Generierung der Simulation ist aufgrund Datendurchgängigkeit möglich.	3, 4, 5	Verkürzung der Gesamt-DLZ
I-13 -> S-6	Verkürzung	Datendurchgängigkeit, Standardisierung und Parallelisierung der Vorgänger-Prozessschritte ermöglichen Teil-Automatisierung.	1, 3	Verkürzung der Gesamt-DLZ
I-13 -> S-6	Vorziehen	Datendurchgängigkeit, Standardisierung und Parallelisierung der Vorgänger-Prozessschritte ermöglichen Frontloading.	1, 3	Verkürzung der Gesamt-DLZ

I-1 -> S-1, S-2	Parallelisierung	Frühere Einbeziehung der Anlagenplanung, Verbindliche Definition von Standards und Bibliotheken.	1	Verkürzung der Gesamt-DLZ, Standardisierungsgrad steigt
I-8 -> S-12, S-13, S-14, S-15, S-16	Parallelisierung	Datendurchgängigkeit, Standardisierung und Parallelisierung der Vorgänger-Prozessschritte ermöglichen Teil-Automatisierung und Parallelisierung.	3, 4, 5	Prozessqualität steigt, Verkürzung der Gesamt-DLZ
S-2, S-3	Hinzufügen	Zur Umsetzung der früheren Einbeziehung der Anlagenplanung werden diese Schritte verbindlich im Prozess verankert.	-	Steigerung der Transparenz, Prozessqualität steigt
I-2, I-4 -> S-4	Verkürzung	Objektorientierung in der Layoutplanung und Frontloading ermöglichen die frühere Bereitstellung des Layouts.	2, 3	Steigerung der Transparenz, Prozessqualität steigt, Verkürzung der Gesamt-DLZ
S-7, S-8	Hinzufügen	Datendurchgängigkeit und Anforderungs-Transparenz ermöglichen die Entscheidung für die Verwendung einer Referenzanlage.	5	Verkürzung der Gesamt-DLZ, Standardisierungsgrad steigt

## 8 Ableitung, Definition und Detaillierung einer ganzheitlichen Transformationsstrategie

Auf Basis der bisherigen Erkenntnisse sowie der im vorherigen Kapitel beschriebenen potenziellen Prozessverbesserungen kann die Notwendigkeit nach einer ganzheitlichen Transformationsstrategie bestätigt werden. Zur Definition und optimalen Umsetzung der technischen, prozessualen und organisatorischen Maßnahmen wird im Folgenden eine ganzheitliche Transformationsstrategie vorgeschlagen.

### 8.1 Ganzheitliche Transformationsstrategie

Die in Kapitel 2.3.4 identifizierten Charakteristika für Transformation bilden die Grundlage für die Auswahl der Bestandteile der ganzheitlichen Transformationsstrategie. Anhand der Bewertung und dem anschließenden Vergleich in Kapitel 3.5 können die optimalen Ansätze für die Transformation der betrachteten Dimensionen Technik, Prozess und Organisation identifiziert werden. Jedoch kann keiner der Ansätze für sich allein genommen alle drei Dimensionen hin zu durchgängigem digitalem Engineering transformieren, daher wird eine Kombination der Ansätze in Form einer Verschachtelung vorgeschlagen. Die dazu betrachteten Ansätze sind für die Technik-Säule der Migrationsprozess PERFoRM nach [102], welcher für die Anwendung im Anlagenentstehungsprozess etwas angepasst werden muss, da der originale Ansatz den Fokus stark auf bereits bestehende Produktionssysteme und deren Migration legt. Für die Prozess-Säule wird die Prozessoptimierungsstrategie Kaizen nach [108] gewählt und für die Organisation-Säule die Theorie sozialen Lernens nach [135]. Außerdem wird als Rahmenwerk die Transformationsstrategie Digital Orchestra Framework nach [146] vorgeschlagen. Die 12 Aspekte des Digital Orchestra Framework werden entweder separat betrachtet oder in Kombination mit einem oder mehreren der Säulen-spezifischen Vorgehensweisen, wie in Abbildung 46 anhand der farbigen Markierungen („Punkte“) dargestellt. Dabei ist außerdem zu beachten, dass die einzelnen Schritte des Rahmenwerks und der Säulen-spezifischen Maßnahmen nicht direkt in zeitlicher



Abhängigkeit stehen, sondern parallel aber innerhalb der Säule in der jeweiligen Reihenfolge umgesetzt werden können.

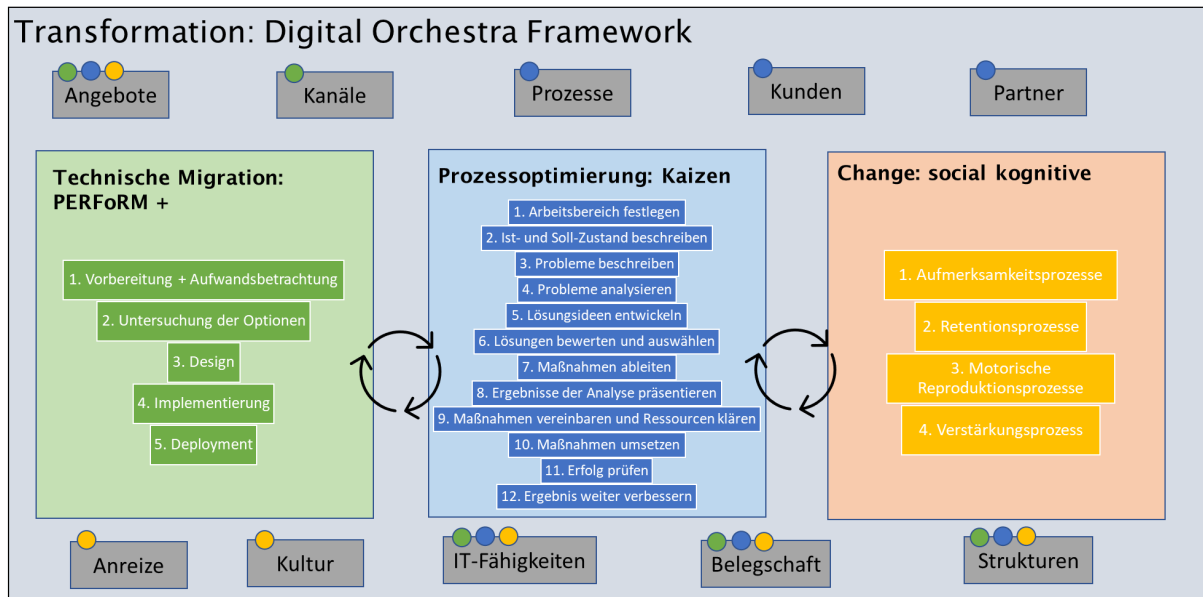


Abbildung 46: ganzheitliche Transformationsstrategie

Das Rahmenwerk Digital Orchestra bietet für die vorgeschlagene ganzheitliche Transformationsstrategie den Rahmen, in den alle Maßnahmen der ganzheitlichen Transformationsstrategie eingeordnet werden können, wodurch die Konsistenz der Einzelmaßnahmen sichergestellt und gleichzeitig eine zeitliche Unabhängigkeit der Einzelmaßnahmen ermöglicht wird. Aus organisatorischer Sicht wird vorgeschlagen, die ganzheitliche Transformation als Projekt aufzusetzen, wobei es einen Gesamtverantwortlichen gibt, der alle Maßnahmen überblickt und koordiniert und weiterhin für jede der drei Säulen einen zusätzlichen Verantwortlichen, der die spezifischen Maßnahmen koordiniert und den Informationsfluss zwischen den Säulen sicherstellt. Die ausgewählten Personen haben im Optimalfall sowohl Fachexpertise in dem betrachteten Bereich als auch signifikante Erfahrung in der Anwendung von Transformationsprozessen.

Im Folgenden werden die zwölf Aspekte des Digital Orchestra Frameworks nach [146], die wiederum vier Sektionen zugeordnet sind, in Zusammenhang mit der Transformation hin zu durchgängigem digitalem Engineering detailliert beschrieben. Die einzelnen Aspekte dienen innerhalb der Transformationsstrategie als Leitfragen

zur Definition des Zielzustandes, der durch die Transformation erreicht werden soll. Die konkreten Werkzeuge zur Erreichung dieses Zielzustandes sind Bestandteile der säulenspezifischen Maßnahmen.

**Sektion 1 – Go-to-Market:** In dieser Sektion geht es darum, dass das Unternehmen oder der zu transformierende Bereich sich detailliert damit auseinandersetzt, welche Produkte oder Dienstleistungen angeboten werden oder werden sollen und wie das Angebot konkret erfolgt. In dem in der vorliegenden Arbeit betrachteten Umfeld ist die angebotene Dienstleistung beispielsweise die Planung eines Produktionssystems oder von Teilen daraus.

**1. Angebot:** Der betrachtete Bereich definiert hier im Detail, welche Angebote das Unternehmen, der Bereich oder relevante Stakeholder benötigen, um Chancen zu nutzen oder Bedrohungen abzuwehren. Dabei soll unter anderem die Frage beantwortet werden, wie sich die neuen digitalen Angebote von Ihren traditionellen Angeboten unterscheiden und ob die Angebote rein digital gestaltet sind oder aus einer Kombination von physischen und digitalen Elementen bestehen. Im Kontext des Anlagenentstehungsprozesses kann das Angebot, also die Planung des Produktionssystems, viele unterschiedliche Teilaspekte und auch diverse Ausprägungen dieser haben. Daher muss für eine erfolgreiche Transformation in Abhängigkeit der konkreten Sachverhalte genau betrachtet werden, wie die Ausgestaltung des angebotenen Engineerings aussehen kann.

**2. Kanäle:** Dieser Aspekt betrachtet die Bereitstellung der angebotenen Leistung auf verschiedenen Kanälen. Die Planung bzw. das Engineering können bspw. in Echtzeit in einer 3D-Plattform erfolgen oder komplett analog auf dem Schreibtisch des Planers. Dabei ist wichtig, dass sich der zu transformierende Bereich darüber im Klaren ist, welche Kanal-Ausprägungen es gibt und für welches Szenario welche Ausprägung optimal ist. Für die technische Migration hin zu Kanälen, die bisher noch nicht bespielt wurden, kann der im folgenden Kapitel beschriebene Migrationsansatz angewendet werden.

**Sektion 2 – Engagement:** In dieser Sektion geht es darum, dass das Unternehmen oder der zu transformierende Bereich sich detailliert damit auseinandersetzt, wie zukünftig

der Umgang mit den wichtigsten Stakeholdern erfolgen wird. Dabei werden folgende drei Stakeholder betrachtet: Kunde, Partner und Belegschaft.

**1. Kunden:** Im Rahmen einer erfolgreichen Transformationsstrategie muss untersucht werden, inwiefern auch mit Hilfe digitaler Technologien mit den jeweiligen Kunden des Bereichs interagiert wird und welche Arten von Informationen ausgetauscht werden. Dieser Aspekt des Rahmenwerks kann im Rahmen der Prozessoptimierung im Detail untersucht werden, damit sichergestellt wird, dass der optimierte Prozess maximal am Kunden orientiert ist und als Output den größten Mehrwert für den Kunden generiert.

**2. Partner:** Im Rahmen des Anlagenentstehungsprozesses aus Sicht eines OEMs spielen Partner und Lieferanten eine zentrale Rolle. Aus diesem Grund ist es von zentraler Bedeutung für die Definition des Rahmenwerks zur ganzheitlichen Transformation, dass diese gesondert betrachtet werden. Dabei ist insofern die Frage zu untersuchen, welche Rolle dieses gesamte Netzwerk bei der Prozessoptimierung spielt und wie die Schnittstellen optimal gestaltet werden können.

**3. Belegschaft:** Wie in Kapitel 2.3.4 beschrieben, stellt der „Faktor Mensch“ den bedeutendsten Aspekt einer ganzheitlichen Transformation dar. Daher muss in allen Bestandteilen der Transformationsstrategie berücksichtigt werden, welche Auswirkungen bestimmte Maßnahmen auf die Mitarbeiter haben, welche Fähigkeiten dazu notwendig sind und wie sich die Arbeit dadurch ändern wird. So muss im Rahmen der technischen Migration, der prozessualen Optimierung und des organisatorischen Changes stets der Mensch im Mittelpunkt stehen und alle genutzten Werkzeuge und angewandten Maßnahmen daran orientiert werden. Für die Definition des Rahmenwerks der ganzheitlichen Transformation ist es demnach ein wichtiger Schritt, die Belegschaft des betrachteten Bereichs oder relevanter Schnittstellen-Bereiche genau zu analysieren in Hinblick auf Zusammensetzung, Wissen, Fähigkeiten, Kultur, Einstellung gegenüber Digitalisierung und weiteren relevanten Messgrößen.

**Sektion 3 – Betrieb:** In dieser Sektion geht es darum, dass das Unternehmen oder der zu transformierende Bereich sich detailliert damit auseinandersetzt, wie sich die

Abläufe im Unternehmen oder im betrachteten Bereich verändern und welche speziellen Fähigkeiten dazu vorhanden sein müssen.

**1. Prozesse:** Die Prozessoptimierung spielt für die ganzheitliche Transformation eine zentrale Rolle und stellt demnach eine der drei Säulen der Gesamt-Strategie dar. Für die Definition des Rahmenwerks ist es notwendig, vorab festzulegen, welche Ziele mit der Prozessoptimierung verfolgt werden sollen. Dazu können unter anderem folgende Fragen gestellt werden: Auf welche Weise werden neue Geschäftsprozesse geschaffen oder bestehende geändert, um den Kunden den größten Mehrwert zu bieten? Inwieweit müssen Prozesse angepasst werden, um die Vorteile neuer Datenquellen zu nutzen und welche Datenquellen spielen die wichtigste Rolle? Welche Prozesse müssen digitalisiert oder automatisiert werden? Diese und weitere Fragen können im Vorfeld zu der eigentlichen Prozessoptimierung (siehe Kapitel 8.3) betrachtet werden und so einen Rahmen für diese schaffen.

**2. IT-Fähigkeiten:** Um jede der drei Säulen der ganzheitlichen Transformationsstrategie erfolgreich zu durchlaufen, ist die Analyse der zukünftig benötigten IT-Fähigkeiten ein wichtiger Baustein. Außerdem muss in diesem Zusammenhang betrachtet werden, inwieweit diese Fähigkeiten heute schon im Unternehmen oder dem zu transformierenden Bereich vorhanden sind oder ob diese erst aufgebaut werden müssen. Im Detail werden diese Fragestellungen in Kapitel 8.4 betrachtet.

**Sektion 4 – Organisation:** In dieser Sektion geht es darum, dass das Unternehmen oder der zu transformierende Bereich sich detailliert damit auseinandersetzt, wie sich die Organisation – in Bezug auf ihre Struktur und ihr Ethos – verändern muss, um die Transformation zu unterstützen? Dieser Abschnitt umfasst drei Instrumente:

**1. Strukturen:** In erster Linie im Rahmen des organisatorischen Changes muss untersucht werden, ob die bestehenden Strukturen im Unternehmen oder im betrachteten Bereich für die ganzheitliche Transformation bereits ausreichen oder ob beispielsweise separate Organisationseinheiten eingeführt werden müssen, die sich mit der Transformation befassen. Wenn ja, muss entschieden werden, ob diese parallel zur bestehenden Organisation aufgebaut werden oder ob separate

Geschäftsbereiche in das Unternehmen integriert werden. Auch eine neue Gesamt-Organisationsstruktur könnte denkbar sein. Diese strukturellen Rahmenbedingungen der ganzheitlichen Transformation werden sowohl von jeder der drei Säulen beeinflusst, haben aber auch selbst Einfluss auf die konkrete Ausgestaltung der Säulen und werden demnach in den Kapiteln 8.2, 8.3 und 8.4 jeweils mit betrachtet.

**2. Anreize:** Um bei der Definition des Change Prozesses im Rahmen der ganzheitlichen Transformation die organisatorischen Rahmenbedingungen zu kennen, ist die grundlegende Definition eines Anreiz-Systems im Unternehmen oder im betrachteten Bereich notwendig. Dabei muss sichergestellt sein, dass das Anreiz-System so gestaltet ist, dass die Belegschaft sich aktiv am Change beteiligt und die nötigen Prozessänderungen, Weiterbildungen etc. unterstützt.

**3. Kultur:** Wie bereits erwähnt, ist der „Faktor Mensch“ der entscheidende Aspekt, wenn es um den Erfolg der ganzheitlichen Transformation geht. Kultur und Mentalität der beteiligten Menschen werden in verschiedenen Quellen (z. B. [213]) häufig als die größten Hindernisse für die digitale Transformation genannt. Daher ist die Aufgabe dieses letzten Aspekts des Rahmenwerks die Einflussnahme auf die Motivation und die Wahrnehmung der Mitarbeiter, um diese zu ermutigen, den Wandel anzunehmen. Dieser Aspekt wird ausführlich in Kapitel 8.4 aufgegriffen.

## 8.2 Technische Migration zum SOLL-Prozess anhand „PERFoRM+“

Da es für die digitale Transformation und die Einführung durchgängigen digitalen Engineerings keinen klaren branchenweiten Ansatz gibt, wird für die damit verbundene technische Migration der schrittweise Ansatz „PERFoRM+“ angewendet, welcher auf [102] basiert und ursprünglich für die Migration hin zu cyberphysischen Produktionssystemen entwickelt wurde.

Das generelle Vorgehen dieses Prozesses beginnt mit der Festlegung des Ausgangspunkts, indem die langfristige Vision der Geschäftsstrategie als Leitfaden verwendet wird, um zu verstehen, in welche Richtung die inkrementellen Verbesserungen im Rahmen der technischen Migration gehen sollen. Im Kontext dieser Arbeit stellt die langfristige Vision den Ziel-Anlagenentstehungsprozess dar,

den der OEM gemäß der Unternehmensstrategie langfristig zu erreichen beabsichtigt. Sobald der Fokus der technischen Migration identifiziert ist, wird die aktuelle Situation des Engineeringprozesses aus technischer Sicht analysiert, um den Ausgangspunkt für die Migration zu verstehen.

Um dabei mögliche Risiken und Hindernisse abzumildern, wird der Migrationspfad zur langfristigen Vision in kurzfristige Zwischenziele unterteilt, die nach und nach erreicht werden und jeweils für sich genommen bereits durch ihre Umsetzung einen Nutzen bringen. Aus den Ergebnissen der Ist-Analyse in Kombination mit Transparenz über die langfristige Unternehmensvision ergibt sich demnach die jeweils nächste Zielbedingung, wobei das Erreichen des ersten kurzfristigen Ziels sowie der folgenden Ziele einen Migrationsschritt in Richtung der langfristigen Vision darstellt. Das finale Ziel der Migration muss bei diesem Ansatz nicht bereits zu Beginn vollständig bekannt sein, stattdessen stellt dies das "Fuzzy-Front-End" der Innovation dar, bei dem mehrere mögliche Lösungsoptionen im Hinblick auf neue Technologien, Anwendungen und Systeme in Betracht gezogen werden und unter verschiedenen Aspekten bewertet werden.

Da der Ansatz in erster Linie von seinem inkrementellen und schrittweisen Vorgehen profitiert, erfolgt nach der Durchführung des ersten Migrationsschritts eine weitere Iteration, indem die neue aktuelle Situation als Ausgangspunkt verwendet wird (Abbildung 47: Definition des Migrationspfads nach PERFoRM). Genauso können die Marktbedingungen, Anforderungen und verfügbaren Technologien weiterentwickelt werden und als neue Input-Größen für die Definition der kurzfristigen Ziele verwendet werden. Dadurch können neue mögliche Lösungsoptionen zur Erreichung des nächsten Ziels und zur Durchführung eines weiteren Migrationsschritts ermittelt und bewertet werden.

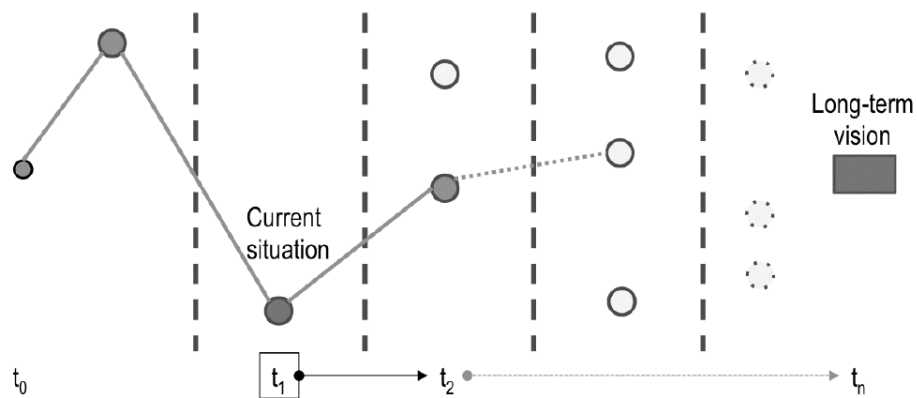


Abbildung 47: Definition des Migrationspfads nach PERFoRM [102]

Ziel des Migrationsprozesses ist es, den optimalen Weg zur langfristigen Vision des Unternehmens zu definieren, indem Schritt für Schritt eine Reihe kurzfristiger Ziele betrachtet wird. Die kontinuierliche Verbesserung des Anlagenentstehungsprozesses durch die regelmäßige Festlegung des nächsten kurzfristigen Ziels auf der Grundlage sich ändernder Bedingungen und Anforderungen ist dabei der Schlüssel zum Erfolg. Diesem Ansatz folgend kann das Engineering bei jedem Migrationsschritt verbessert werden, indem nach und nach neue technische Funktionen eingeführt werden

Um die Anwendung des PERFoRM+ Ansatzes für die technische Migration hin zu durchgängigem digitalem Engineering zu unterstützen, werden in Kapitel 8.2.2 einige konkrete Methoden und Werkzeuge vorgeschlagen, die in den einzelnen Phasen der Migration hinzugezogen werden können.

### 8.2.1 Beschreibung der Vorgehensweise „PERFoRM+“

Der Migrationsprozess, der in der vorliegenden Arbeit eine der drei Säulen einer ganzheitlichen Transformationsstrategie darstellt, wurde in [102] vorgeschlagen und lehnt sich an andere industrielle Standard-Engineering-Prozesse an. Das Ziel des angepassten und hier vorgeschlagenen Migrationsprozess ist es, die kontinuierliche Verbesserung des Anlagenengineerings zu unterstützen. Um den Migrationspfad zu vollziehen, wird der Prozess für jeden Verbesserungsschritt wiederholt, bis das Migrationsziel vollständig erreicht ist.

Die 5 Phasen des Migrationsprozesses sind: Vorbereitung, Untersuchung der Optionen, Design, Implementierung und Deployment. In den folgenden Abschnitten werden die Phasen des Prozesses detailliert beschrieben, während die möglichen Methoden und Werkzeuge in Kapitel 8.2.2 vorgestellt werden.

### **Phase „Vorbereitung“:**

Ähnlich zu anderen technischen Entwurfsprozessen besteht auch hier der erste Schritt in der Definition des Problems. Die Problemstellung wird in der Regel in Form von "Wer braucht Was, Warum" definiert, woraus unter Berücksichtigung der Bedürfnisse der Beteiligten die Systemanforderungen abgeleitet werden können. Dies bildet die Ausgangsbasis für das Migrationsprojekt. Besonders wichtig im Kontext der ganzheitlichen Transformation ist die Orientierung der technischen Migration an den beiden weiteren Säulen Prozess und Organisation. So müssen in die Definition des Zielzustandes zwingend die Ergebnisse aus der prozessualen Optimierung sowie des organisatorischen Changes miteinfließen. Da die Säulen parallel bearbeitet werden können, ist der iterative Ansatz in allen drei Säulen von zentraler Bedeutung, da so ermöglicht wird, dass Ergebnisse und Anforderungen aus den anderen Säulen stets berücksichtigt werden. Demnach wird nicht das Prinzip „Lean before Digital“, sondern das Prinzip „Lean and Digital in Cooperation“ verfolgt.

Das Hauptziel der Vorbereitungsphase ist die Analyse der aktuellen Situation der Systemlandschaft und der Verbesserungsmöglichkeiten. Durch eine detaillierte Untersuchung des relevanten Unternehmensbereichs und der stattfindenden Prozesse unter Einbindung verschiedener am Prozess beteiligter Rollen können die Anforderungen an die neue Systemlandschaft definiert werden. Außerdem können wirtschaftliche, funktionale und prozessuale Kennzahlen definiert werden, die die tatsächlichen Auswirkungen der Implementierung von neuen Funktionen oder Systemen messbar machen können. Zudem werden in dieser Phase die Systemanforderungen mit den bestehenden Altsystemen verglichen, um festzustellen, wie diese oder ggf. neue Systeme in das Architekturbild passen. Zu diesem Zweck können ebenfalls Bewertungskriterien definiert und verwendet werden,



um die Kompatibilität von Altsystemen und auch von neuen Technologien mit den definierten Anforderungen zu messen und zu überprüfen [214].

Auf Grundlage der gesammelten Informationen wird der Zielzustand definiert und eine vorläufige Risiko- und Auswirkungsanalyse durchgeführt, um festzustellen, ob der Migrationsprozess fortgesetzt werden kann oder ob bestimmte Bedingungen angepasst werden müssen. An dieser Stelle findet außerdem die Erweiterung des ursprünglichen PERFoRM Ansatzes nach [102] statt, indem zusätzlich zur Risiko- und Auswirkungsanalyse eine Aufwand-Nutzen-Analyse des jeweiligen Migrationsschritts durchgeführt wird, indem die Kosten und sonstigen Aufwände für die jeweilige Migration dem davon versprochenen Nutzen gegenübergestellt werden.

Nach der Logik der Migrationspfaddefinition ergeben sich aus dieser Phase demnach Transparenz über die aktuelle Situation sowie über die langfristige Vision der Migration für den betrachteten Engineeringprozess.

#### **Phase „Untersuchung der Optionen“**

Nach dem in [102] definierten PERFoRM-Ansatz werden auf Grundlage der in der vorangegangenen Phase gewonnenen Erkenntnisse nun die möglichen Optionen zur Umsetzung der IT-Zielarchitektur bewertet, um deren Eignung zur Erreichung des festgelegten Ziels zu analysieren. Die Bewertung der Migrationsoptionen erfolgt auf Basis der festgelegten Bereichsstrategie und den Ergebnissen der durchgeführten Aufwand-Nutzen-Analysen, um den Nutzen der implementierten Lösung zu gewährleisten und dem Prozess bei jedem kleinen Migrationsschritt einen Mehrwert zu bieten.

Um jede Technologielösung in Richtung eines durchgängigen digitalen Engineeringprozesses zu bewerten, können die Kriterien des PERFoRM Ansatzes mit kleinen Anpassungen herangezogen werden. Die elf Kriterien wurden von Meyer et al. [214] aus der strategischen Bewertungsmethodik für Fertigungstechnologien von Partovi abgeleitet. Diese Bewertungskriterien sind im Folgenden aufgeführt:

1. Benutzerfreundlichkeit: Grad der Benutzerfreundlichkeit

2. Reifegrad: Entwicklungsstand und Bereitschaftsgrad
3. Automatisierung: Grad der Automatisierung
4. Integrität: Grad der Integrität innerhalb anderer Systeme
5. Nutzen: wirtschaftlicher Gewinn
6. Substitution: Fähigkeit, durch eine andere konkurrierende Technologie ersetzt zu werden
7. Verfügbarkeit: Verfügbarkeit und Unterstützung auf dem Markt
8. Potenzial: Potenzial für den künftigen Markt
9. Robustheit: Robustheit und Anfälligkeitsgrad
10. Sicherheit: Verfügbarkeit von Sicherheitsmechanismen
11. Industrie 4.0: Relevanz für Industrie 4.0

Besonders wichtig für die Bewertung der Lösungsoptionen ist auch die Identifikation von kritischen Abhängigkeiten der Lösung innerhalb der Zielarchitektur, da die neue Lösung Auswirkungen auf bestehende Systeme, laufende Projekte und Personalressourcen haben wird. Die Fehleinschätzung der kritischen Abhängigkeiten auf technischer, betrieblicher und menschlicher Ebene der Fabrik kann zum Scheitern des Migrationsprozesses führen.

### **Phase „Design“**

Sobald das Zielsystem und seine Komponenten auf Basis der Ergebnisse der vorherigen Phasen definiert sind, werden in dem PERFoRM-Ansatz nach [102] Machbarkeitstests durchgeführt, um sicherzustellen, dass das System alle festgelegten Anforderungen erfüllt und die Integration heterogener Systeme ermöglicht. In Abhängigkeit der Ergebnisse der Machbarkeitstests kann es nötig sein, das Zielsystem neu zu bewerten und in einer weiteren Iteration der Entwurfsphase andere Lösungen zu betrachten.

Im Zuge der Machbarkeitstests können zudem Risikoanalysen durchgeführt werden, um mögliche Hindernisse während der Migration besser einschätzen zu können und Notfallpläne vorab entwickeln zu können.

Schließlich wird auf Basis aller nun vorhandenen Informationen eine Strategie zur Durchführung der Migration ausgewählt. Gemäß Kapitel 3.1.2 kann die Migration nach einer Big-Bang-Strategie erfolgen, d. h. das neue System ersetzt das alte System direkt, oder nach der Parallel Systems Strategie, bei der das alte und das neue System über einen bestimmten Zeitraum nebeneinander bestehen, oder aber nach der Strategie der schrittweisen Implementierung, die insbesondere bei sehr komplexen Lösungen relevant sein kann.

Die Wahl der Implementierungsstrategie hängt hauptsächlich von der Komplexität der Lösung aus technischer Sicht ab. Für die Migration von Systemen, die für den Engineeringprozess von Anlagen verwendet werden, liegt meist eine sehr hohe Komplexität sowie hohe Ansprüche an die Verfügbarkeit des Systems vor. Außerdem gibt es zahlreiche Systeme, die nur von wenigen Experten genutzt werden, da die Funktionalitäten speziell auf einzelne Spezialisten-Tätigkeiten ausgerichtet sind. In diesem Fall kann es auch sinnvoll sein, die Nutzer der Systeme in die Entscheidung für die Migrationsstrategie einzubeziehen.

### **Phase „Implementierung“**

Die Implementierungsphase in PERFoRM nach [102] ist die Phase, in der die Lösung entsprechend der in der Vorbereitungs- bzw. Entwurfsphase erstellten Anforderungsliste und Spezifikationen realisiert und verifiziert wird. Dazu können für die Migration von Systemen im Anlagenentstehungsprozess verschiedene Wege in Frage kommen. Da die bisher eingesetzten Lösungen meist Standardlösungen großer Anbieter sind, können diese zum einen gemeinsam mit dem Anbieter nach den Anforderungen des OEM weiterentwickelt werden, zudem können bisher unbekannte Lösungen anderer Anbieter in Betracht gezogen werden oder durch den OEM selbst ein passendes System entwickelt werden. Die Entscheidung für einen Weg hängt vorwiegend von den Kosten bzw. dem nötigen Aufwand und der benötigten Dauer ab und muss im Einzelfall genau betrachtet werden.

Sobald eine mögliche Lösung technisch verfügbar ist, muss in dieser Phase zudem ein Implementierungsplan definiert werden. Der Implementierungsplan und die Lösung werden schließlich noch einmal überprüft, bevor sie den Planern für die Durchführung ihrer Tätigkeiten zur Verfügung gestellt werden. Die Verifizierung dient der Überprüfung der korrekten Implementierung der Ziellösung, z. B. der architektonischen Merkmale oder der Verfügbarkeiten aller definierten Funktionen in ihrem entsprechenden Umfang. Jede Lösungskomponente wird dabei mit ihren spezifizierten Anforderungen verglichen, wobei dies sowohl für Software- als auch für Hardwaresysteme geschehen muss.

### **Phase „Deployment“**

Diese Phase ist jedem Migrationsprozess gemeinsam und besteht aus dem tatsächlichen Übergang des Systems in die neu implementierte Lösung. Die Installation des Systems umfasst zudem Aktivitäten zur Integration und Validierung der Lösung in der realen Umgebung. Die Integration erfolgt dabei gemäß der in der vorangegangenen Phase festgelegten Migrationsstrategie.

Sobald das System validiert ist, wird der Migrationsschritt vollständig durchgeführt und das System transformiert. An diesem Punkt beginnt der PERFoRM-Prozess nach [102] erneut mit der Vorbereitungsphase, da das System nun eine neue "aktuelle" Situation aufweist. Nach demselben Verfahren werden die nächsten Migrationsschritte definiert, bis die langfristige Vision vollständig erreicht ist.

Für die Integration der technischen Migration in die ganzheitliche Transformation ist es wichtig, die Integration und den Einsatz der neuen Systemkomponenten nicht nur in Bezug auf ihre technische Machbarkeit, sondern auch hinsichtlich der damit verbundenen Abläufe und Auswirkungen auf den Menschen zu betrachten. Um dies sicherzustellen, müssen die Aktivitäten innerhalb der drei Säulen eng miteinander verzahnt sein und ein permanenter Informationsfluss etabliert sein. Wie die Maßnahmen zur optimalen Anpassung der Planungsprozesse sowie die Aktivitäten im Rahmen des organisatorischen Changes konkret aussehen, wird in den folgenden Kapiteln dargestellt.

## 8.2.2 Methoden und Werkzeuge für die Anwendung von “PERFoRM+“

Um bestehende Unsicherheiten im Rahmen der technischen Migration zu überwinden und die Risiken der ganzheitlichen Transformation zu mindern, sind auch neue Methoden und Werkzeuge erforderlich. In diesem Abschnitt werden drei Lösungen vorgestellt, die für die Phasen der Vorbereitung, der Untersuchung der Optionen und des Designs entwickelt wurden.

### **Fragebogen (Anhang C – Fragebogen)**

Viele Unternehmen, die am Beginn einer Transformation stehen, kennen ihren Ausgangspunkt nicht in der Detailtiefe, die für die Auswahl der optimalen Transformationsstrategie notwendig ist [24]. Durch die in Kapitel 6.1 beschriebene Interviewdurchführung zur Definition der IST-Prozesse konnte dies ebenso festgestellt werden, wenn konkret der Anlagenentstehungsprozess im Fokus der Betrachtung steht.

Aus diesem Grund kann die Anwendung eines Fragebogens während der ersten Phase des PERFoRM+ Ansatzes ein wertvolles Hilfsmittel sein, um einen fundierten Überblick über die aktuellen Rahmenbedingungen zu erhalten. Der im Rahmen des ursprünglichen PERFoRM Ansatzes entwickelte Fragebogen [103] wird für die Erhebung des Ist-Standes in Bezug auf die technischen Rahmenbedingungen des Anlagenentstehungsprozesses als Grundlage genommen und unter Beachtung der VDI Richtlinie 3695 [10] sowie der in Kapitel 8.1 definierten ganzheitlichen Transformationsstrategie angepasst. Die Durchführung und Anwendung des Fragebogens orientiert sich an dem in [24] beschriebenen Vorgehen und wird im Folgenden kurz beschrieben.

Für jede Frage gibt es eine vordefinierte Liste möglicher Antworten, die auf der Grundlage des CMMI (Capability Maturity Model Integration) [215] und des DREAMY-Modells (Digital REadiness Assessment Maturity) [216], in eine Rangfolge (Stufe 1 als niedrigste Möglichkeit bis Stufe 5 als höchste Möglichkeit) gebracht werden. Die Stufen lassen sich in Anlehnung an PERFoRM [24], die VDI Richtlinie 3695 [10], CMMI [215] und DREAMY [215] wie folgt beschreiben.

- Stufe 1 - Der Planungsprozess wird nicht durch die geeigneten Technologien und IT-Tools unterstützt, um durchgängiges digitales Engineering zu ermöglichen. Es gibt keine übergreifend standardisierten Prozesse oder Datenformate und keine dedizierte IT-Architektur.
- Stufe 2 - Es stehen keine Technologien oder IT-Systeme zur Verfügung, die es ermöglichen den Verlauf des Anlagenentstehungsprozesses zu verfolgen und zu kontrollieren. Die Prozesse werden auf der Grundlage der Erfahrungen der Planer festgelegt und den Menschen fehlt es an entsprechenden Kenntnissen und Fähigkeiten.
- Stufe 3 - Die Beschränkungen der Technologien verhindern eine vollständige Datendurchgängigkeit; bewährte Verfahren werden zwar umgesetzt, weisen jedoch Daten- und Systembrüche auf. Teilweise werden Synergien siloübergreifend genutzt.
- Stufe 4 - Die IT-Architektur ist besser an die Anforderungen durchgängigen digitalen Engineerings angepasst und in der Lage, die Transformation zu unterstützen, um eine umfassende Datendurchgängigkeit und Kollaboration zu erreichen. Prozesse sind vollständig definiert und werden unter Verwendung gemeinsamer und geteilter Standards umgesetzt.
- Stufe 5 - Der Planungsprozess verfügt über eine solide technologische Infrastruktur, die eine vollständige Interoperabilität und Vernetzung der Systeme ermöglicht; der Prozess ist digital ausgerichtet und basiert auf einem schnellen, robusten und sicheren Informationsaustausch; die Organisation ist auf kontinuierliche Verbesserung ausgerichtet und das Transformationsmanagement erfolgt nach klar definierten Grundsätzen.

Das Bewertungsverfahren wird in drei Phasen durchgeführt, welche in [24] beschrieben sind.

Die Ergebnisse ermöglichen die Identifizierung der schwächsten Punkte, die anschließend die Transformation des Anlagenentstehungsprozesses auf technischer Ebene vorantreiben.

## Migration Matrix in Anlehnung an [24]

Die „Migrationsmatrix“ ist ein visuelles Tool, das ursprünglich in [103] und [217] entwickelt und beschrieben wurde und auf der „Toolbox Industrie 4.0“ der VDMA-Richtlinien in [218] basiert. Für die Migration hin zu durchgängigem digitalem Engineering wird dieses Tool dahingehend angepasst, dass anhand der vorhandenen technischen Systeme, Prozesse und Organisation analysiert werden kann, wie der Planungsprozess im Hinblick auf den digitalen Reifegrad eingeschätzt werden kann. Die Migrationsmatrix soll auch einen strukturierten Leitfaden zur Identifizierung der Handlungsfelder bieten, um die Migration entsprechend ihrer aktuellen Situation zu bewältigen. Die Migrationsmatrix für durchgängiges digitales Engineering ist in Abbildung 48 dargestellt.

Das übergeordnete Ziel bei der Verwendung der Migrationsmatrix besteht darin, einen Überblick über die möglichen Migrationsszenarien zu gewinnen. Wichtig zu beachten ist, dass die Migrationsmatrix zeigt, wie die Migrationslösungen der technischen Dimension innerhalb der ganzheitlichen Transformationsstrategie aussehen können. Dabei müssen auch prozessuale und organisatorische Aspekte betrachtet werden, da es zwischen den Dimensionen stets Wechselwirkungen gibt.

Die Migrationsmatrix als visuelles Tool ist als Tabelle strukturiert, in der Zeilen und Spalten die im Fragebogen definierten Elemente widerspiegeln:

- Die Zeilen stellen die relevanten Anwendungsbereiche zur Migration hin zu durchgängigem digitalem Engineering dar. Sie beziehen sich auf die technologischen Maßnahmen, die Implikationen auf den Planungsprozess sowie organisatorische Aspekte. Daher enthalten die Zeilen dieselben Anwendungsbereiche, die nach technischen, prozessualen und organisatorischen Dimensionen unterteilt sind.
- In den Spalten werden die Entwicklungsschritte für jedes Anwendungsfeld beschrieben. Sie stehen für dieselben 5 Stufen des digitalen Reifegrads, welche auch im Fragebogen zugrunde gelegt werden und im vorherigen Abschnitt beschrieben wurden.

Durchgängiges digitales Engineering					
Dimensionen	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5
Technik					
Prozess					
Organisation					

*Abbildung 48: Migrationsmatrix*

Unter Einbeziehung der konkreten Ergebnisse nach einer Datenerhebung mittels des beschriebenen Fragebogens können die Ergebnisse je Anwendungsbereich in der Matrix ergänzt werden. Die Migrationsmatrix für die Migration zu durchgängigem digitalem Engineering mit den dafür identifizierten Anwendungsbereichen ist in Abbildung 49 dargestellt. Für die visuelle Darstellung der IST-SOLL-Situation können die Zellen, die den aktuellen Stand im betrachteten Bereich beschreiben in rot eingefärbt werden und die Zellen, die den Zielzustand (z.B. immer „Stufe 5“) enthalten, in grün eingefärbt werden. Mit dieser Methode kann sichergestellt werden, dass ein visuelles Erkennen von Verbesserungspotentialen vereinfacht wird.



Durchgängiges digitales Engineering					
Dimensionen	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5
<b>Technik</b>	Technische Hilfsmittel				
	Datendurchgängigkeit				
	Objektorientierung				
<b>Prozess</b>	Standardisierung von Vorgehensmodellen				
	Verfügbarkeit von Standard-Bibliotheken				
	Verzahnung Planungsprozess und Betrieb				
<b>Organisation</b>	Vorhandensein von Know-how				
	Definition von übergreifenden Verantwortlichkeiten				

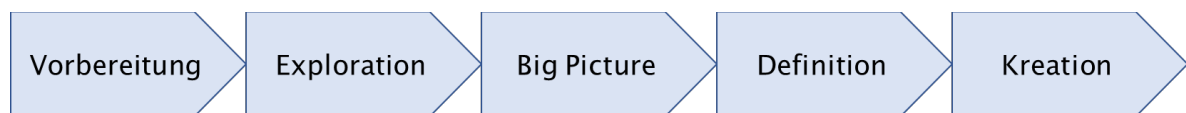
Abbildung 49: Migrationsmatrix durchgängiges digitales Engineering

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Migrationsmatrix zur Ableitung einer Priorisierung von Maßnahmen in allen relevanten Bereichen der technischen Migration hin zu durchgängigem digitalem Engineering führen kann.

Mithilfe der abgeleiteten Migrationsmatrizen, die auf den identifizierten Hindernissen und Chancen basieren, können sich Hersteller einen klaren Überblick über ihre IST-Situation verschaffen und die möglichen nächsten Migrationsschritte auf der Grundlage der wahrgenommenen Vorteile auf Unternehmensebene und der Durchführbarkeit der Lösung in Bezug auf die Implementierung priorisieren. Sobald der aktuelle Zustand der Engineeringprozesse in der Matrix abgebildet ist, sollten Hersteller und Personen, die an der Definition der Migrationsstrategie beteiligt sind, die Verbesserungsmöglichkeiten im Zusammenhang mit der Implementierung digitaler Technologien ausloten.

### **Bebauungsuntersuchung**

Nachdem der für die ganzheitliche Transformation betrachtete Bereich sowie die zugehörigen Schnittstellenpartner identifiziert sind und eine grobe Richtung für die Transformation festgelegt wurde, muss wie in Phase eins, zwei und drei des PERFoRM+ Ansatzes das Lösungskonzept entworfen werden. Als Hilfsmittel und zur Strukturierung des Vorgehens zur Ableitung des Lösungskonzepts kann eine sog. Bebauungsuntersuchung durchgeführt werden, die zum Ziel hat, für einen definierten Bereich eine IT-Zielbebauung zu definieren. Zu dieser IT-Zielbebauung gehören sämtliche IT-Systeme inkl. deren Schnittstellen sowie mögliche Streaming Layer und Datenflüsse. Auch die Bebauungsuntersuchung folgt der Ist-Soll-Logik, wie auch schon im Rahmen der Migrationsmatrix beschrieben wurde. Das Vorgehen der Bebauungsuntersuchung wird in Abbildung 50 beschrieben.



*Abbildung 50: Bebauungsuntersuchung Vorgehen*

Während der Vorbereitungsphase findet zu Beginn ein Projekt Kickoff statt, in dem alle Verantwortlichkeiten, Anforderungen und Erwartungen definiert werden. Anschließend müssen für die darauffolgende Phase bereits Interview-Partner identifiziert werden und die jeweiligen Interviews terminiert werden. Die Interview Partner werden so ausgewählt, dass sowohl der untersuchte Bereich mit all seinen Prozessen, Rollen und Funktionen abgedeckt ist, als auch die direkten Schnittstellen. Außerdem werden alle relevanten Unterlagen gesammelt und gesichtet. In der Explorationsphase finden die Interviews statt, welche die wichtigste Informationsquelle für die gesamte Bebauungsuntersuchung darstellen. Durch die Interviews sollen Prozesse, Rollen und das gesamte Umfeld genau beleuchtet werden, um die aktuelle Bebauung, die gelebten Prozesse sowie die gesamte IT-Landschaft (Systeme, Datenmodelle, etc.) zu verstehen. Auf Basis der Interview Ergebnisse können Problemschwerpunkte abgeleitet und schließlich die gewonnenen Erkenntnisse validiert werden. Das Vorgehen zur Durchführung der Interviews ist in Abbildung 51 dargestellt.

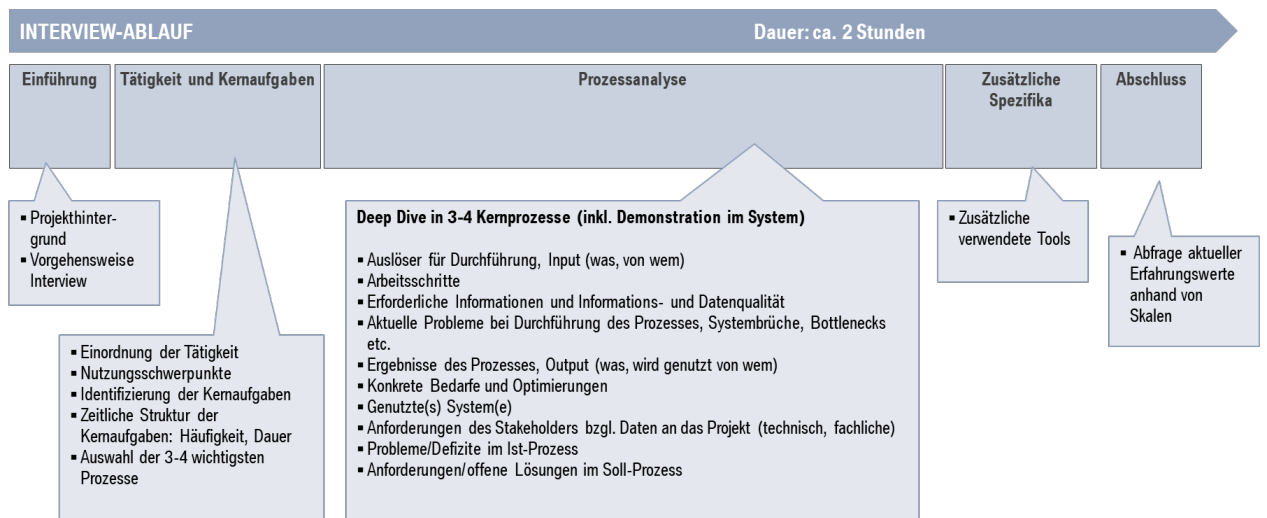


Abbildung 51: Bebauungsuntersuchung – Interviewdurchführung

In der nächsten Phase wird das Big Picture – oder das Zielbild – auf Basis der bisherigen Erkenntnisse aufgebaut. Dabei werden auch die wichtigsten Handlungsfelder benannt und die Ergebnisse der Interviews nochmal validiert. Anschließend wird das Big Picture als Basis für die Detailplanung der Lösungskonzeption genutzt. Dieser Schritt bildet den fließenden Übergang in die Phase der Definition. Hier werden die Anforderungsschwerpunkte an das Lösungskonzept finalisiert und erneut gegenüber den Interviewergebnissen validiert. Außerdem werden die Anforderungen an die Prozesspartner definiert und mit den beteiligten Bereichen abgestimmt. Nachdem alle vorbereitenden Schritte abgeschlossen sind, kann in der Phase der Kreation das konkrete Lösungskonzept bzw. Lösungsszenarien erarbeitet werden. Auf Basis dieses Konzepts bzw. der Szenarien werden dann notwendige Maßnahmen und Umsetzungsschritte definiert.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine Bebauungsuntersuchung ein wertvolles Instrument zur strukturierten Ableitung eines IT-Zielbilds genutzt werden kann und dass unter Beachtung dieser Vorgehensweise sichergestellt ist, dass auch alle Schnittstellen und Prozesspartner einbezogen werden. Durch die Ergebnisvalidierung in jedem Schritt wird die iterative Vorgehensweise des PERFoRM+ Ansatzes optimal unterstützt, da auch hier jederzeit abgebrochen und von vorne begonnen werden kann. Sobald das Ergebnis einer solchen Bebauungsuntersuchung vorliegt, fällt es den

meisten Beteiligten aus Erfahrung deutlich leichter, die notwendigen Maßnahmen umzusetzen, da das Zielbild eindeutig formuliert und visualisiert ist.

### 8.3 Prozessuale Optimierung des Anlagenentstehungsprozesses anhand der Kaizen Methode

Im Rahmen der zweiten Dimension der ganzheitlichen Transformationsstrategie wird der gesamte Anlagenentstehungsprozess oder ausgewählte Teile davon in dem betrachteten Bereich optimiert. Dazu wird auf Basis des Bewertungsergebnisses in Kapitel 3.5 die in Kapitel 3.2.2 beschriebene Prozessoptimierungstechnik „KAIZEN“ als Grundlage vorgeschlagen. Dieses Verfahren ist bereits seit vielen Jahren etabliert und hat sich als sehr wirksam erwiesen. Besonders wichtig ist die Einbettung in das Gesamtverfahren, indem der Verantwortliche für die Säule der Prozessoptimierung einen kontinuierlichen Informationsaustausch zu den Säulen „Technik“ und „Organisation“ sicherstellt und Anforderungen und Erkenntnisse in beide Richtungen kommuniziert.

#### 8.3.1 Beschreibung der Vorgehensweise mit Kaizen

Die detaillierte Vorgehensweise der Kaizen-Methodik [108] ist in Kapitel 3.2.2 beschrieben. Im Folgenden werden die Besonderheiten der einzelnen Phasen innerhalb der Kaizen Methodik in Bezug auf die Einbettung in die ganzheitliche Transformationsstrategie näher betrachtet.

#### **Phase 1. Arbeitsbereich festlegen und abgrenzen**

In dieser Phase wird der Bereich, der bereits durch die Anwendung des Rahmenwerks der ganzheitlichen Transformation identifiziert wurde, durch weitere Analysen verifiziert. Dazu können auch die Ergebnisse des Fragebogens aus Kapitel 8.2.2 herangezogen werden oder Experten aus dem jeweiligen Bereich interviewt werden. Für eine zielgenaue Anwendung der Methodik ist eine fest definierte Abgrenzung des betrachteten Bereichs wichtig.

#### **Phase 2. Ist- und Soll-Zustand beschreiben**

Für die Identifikation des Ist- und Soll-Prozesses wird ein Vorgehen vorgeschlagen, welches im Rahmen der vorliegenden Arbeit bereits validiert wurde. Wie in Kapitel 6 beschrieben, kann der Ist-Prozess im Rahmen von geführten Workshops mit Experten aus jeder Sparte des betrachteten Bereichs erhoben werden. Dieses Vorgehen ist besonders wirksam, da die Personen, die täglich den Prozess leben ungefilterte Einblicke in den tatsächlichen Prozess geben und dadurch wichtige Details erkannt werden können. Für die Definition des Soll-Prozesses können gemeinsam mit den Experten Zielzustände definiert werden, die dann nach Durchführung der Phasen drei, vier und fünf in einen konkreten Soll-Prozess überführt werden können. Eine finale Definition des Soll-Prozesses ist aufgrund der Komplexität des Anlagenentstehungsprozesses in dieser Phase noch nicht möglich.

### **Phase 3. Probleme beschreiben**

Auf Basis des in Phase zwei identifizierten Ist-Prozesses können verschiedene Arten von Problemen abgeleitet werden. Es können übergreifende Probleme auftreten, die den gesamten Prozess oder einen gesamten Abschnitt betreffen, oder es können spezifische Probleme je Prozessschritt auftreten. Auch hier ist der wichtigste Input die Erfahrung der Experten. Die Probleme oder auch Verschwendungen im Prozess sollen dabei so genau wie möglich beschrieben werden und alle relevanten Informationen (z.B. beteiligte Rollen, IT-Systeme, Schnittstellen, etc.) enthalten. Dieses Vorgehen wurde auch in [74] vorgeschlagen und angewendet, um verschiedene Arten der Verschwendung im Engineeringprozess zu erkennen.

### **Phase 4. Probleme analysieren**

Im Anschluss an Phase drei müssen die identifizierten Probleme weiter analysiert werden. Dabei ist es wichtig, dass alle Beteiligten dasselbe Verständnis über die Probleme entwickeln. Zudem können die Probleme, wie in Kapitel 6.1.2 dargestellt, gewichtet werden und so in eine Priorisierungsreihenfolge gebracht werden. Dazu können die Experten bspw. Punkte je Problem vergeben, wobei eine höhere Anzahl an Punkten die negative Bedeutung des Problems für den Gesamtprozess darstellt. Dieses Vorgehen kann außerdem erweitert werden, indem Punkte für verschiedene Kategorien vergeben werden. Dabei liegt es nahe, die gewohnten Kenngrößen Kosten,

Zeit und Qualität zu verwenden. Die Experten können sich dabei die Fragen stellen „Wie viel Kosten kann ich einsparen, wenn dieses Problem gelöst ist?“, „Wie hoch ist die Zeitersparnis, die ich gewinnen kann, wenn dieses Problem gelöst ist“ oder „Wie stark kann ich die Qualität in meinem Bereich erhöhen, wenn dieses Problem gelöst ist?“. Nach Abschluss der Bewertung können die Probleme dann in eine Reihenfolge gebracht werden, welche ein Indikator für die Priorisierung der Problemlösung sein kann.

### **Phase 5. Lösungsideen entwickeln**

Auf Basis der bisherigen Erkenntnisse können nun Lösungsideen für die identifizierten Probleme entwickelt werden. Dazu kann ein Vorgehen wie in Kapitel 6.4 angewendet werden. Die Lösungsideen können dann in Umsetzungspfade (vgl. Kapitel 7.1) übersetzt werden, welche schließlich in ihrer Gesamtheit die Basis für den Soll-Prozess bilden. Je Lösungspfad ist es hierbei wichtig, auf alle relevanten Details (z.B. beteiligte Rollen, benötigte IT-Systeme, benötigte Schnittstellen, etc.) einzugehen und diese bei der Definition des Soll-Prozesses zu integrieren.

### **Phase 6. Lösungen bewerten und auswählen**

Nachdem die Definition des Soll-Prozesses erfolgt ist, können die Lösungspfade und damit verbundene notwendige Maßnahmen hinsichtlich des damit verbundenen Aufwand-/Nutzenverhältnisses bewertet werden. Dieses Verhältnis ergibt sich aus dem zur Umsetzung nötigen Ressourcenaufwand (personell und finanziell) in Relation zu dem erhofften Nutzen, der je nach Lösungspfad oder Maßnahme aus der monetären Bewertung von Zeiteinsparung, Qualitätserhöhung oder direkter Kosteneinsparung besteht. Das Aufwand-/Nutzenverhältnis kann wiederum als Basis für die Ableitung einer Priorisierungsreihenfolge genutzt werden. In dieser Phase ist eine enge Verzahnung mit den beiden weiteren Säulen Technik und Organisation wichtig, da die Umsetzung der Lösungspfade direkte Auswirkungen auf eine mögliche IT-Architektur des betrachteten Bereichs oder gar des gesamten Unternehmens haben können oder eine Organisationsänderung hervorrufen können.

### **Phase 7. Maßnahmen ableiten**

Auf Basis der priorisierten Lösungspfade können nun die Maßnahmen konkretisiert werden und ein Umsetzungsplan in Abstimmung mit den Säulen Technik und Organisation entwickelt werden. Dieser Umsetzungsplan muss eine Terminierung sowie die nötige Ressourcenallokation erhalten, um im Rahmen der ganzheitlichen Transformation zielgerichtet umgesetzt werden zu können. Für die Beschaffung der notwendigen Ressourcen kann die folgende Phase ein wichtiger Befähiger sein.

#### **Phase 8. Ergebnisse der Analyse präsentieren**

In dieser Phase werden alle Ergebnisse inkl. des priorisierten Umsetzungsplans und der dafür nötigen Ressourcen sowie der Implikationen auf die Säulen Technik und Organisation kommuniziert. Die Unterstützung des oberen Managements ist ein wichtiger Faktor für den Erfolg der ganzheitlichen Transformation. Bei einem positiven Aufwand-/Nutzenverhältnisses über den gesamten Umsetzungsplan spricht aus Unternehmenssicht jedoch viel für die Durchführung der Maßnahmen. Auch die Kommunikation der konsolidierten Ergebnisse an die beteiligten Experten ist ein wichtiger Bestandteil dieser Phase, da das übergreifende Zielbild dadurch verstanden werden kann, was wiederum wichtig für das Engagement bei der Umsetzung der Maßnahmen ist.

#### **Phase 9. Maßnahmen vereinbaren und Ressourcen klären**

Die bestätigten Maßnahmen sowie die dafür notwendigen Ressourcen können nach erfolgreichem Abschluss der vorherigen Phase nun konkret ausgeplant werden, indem personelle Ressourcen benannt, finanzielle Ressourcen bereitgestellt und die ersten Schritte zur Umsetzung der Maßnahmen geplant werden.

#### **Phase 10. Maßnahmen umsetzen**

Die Maßnahmen können nun entsprechend dem Umsetzungsplan umgesetzt werden. Dabei ist die enge Abstimmung mit allen beteiligten Prozess- und Schnittstellenpartnern sowie eine regelmäßige Kommunikation an das Management wichtig. Die Maßnahmen werden während der Umsetzung iterativ gegenüber der gewünschten Prozessverbesserung verifiziert und ggf. angepasst. Die Maßnahmen,

die als Anforderungen an die Säulen Technik oder Organisation weitergegeben wurden, werden nachgehalten und dokumentiert.

### **Phase 11. Erfolg prüfen**

Nach Abschluss einzelner oder mehrerer Maßnahmen muss regelmäßig überprüft werden, ob das gewünschte Ergebnis in Hinblick auf die Prozessverbesserung eingetreten ist. Dazu werden Experten wiederkehrend befragt und die Ergebnisse werden nachgehalten (z.B. in Form von Kennzahlen). Bei mangelndem Erfolg müssen die Maßnahmen neu definiert werden und eine erneute Umsetzung in den Umsetzungsplan eingeplant werden.

### **Phase 12. Ergebnis weiter verbessern**

Das iterative Vorgehen spielt in der gesamten ganzheitlichen Transformationsstrategie eine wichtige Rolle. Daher ist es auch Bestandteil der Prozessoptimierung kontinuierlich die Ergebnisse weiter zu verbessern und neu gewonnene Erkenntnisse wieder in neue Maßnahmen einfließen zu lassen. Auf diese Weise kann in dem transformierten Bereich eine neue Denkweise erzielt werden. Mit dieser Denkweise kann es gelingen, dass alle Beteiligten stets die Optimierung der Prozesse im Kopf haben und intrinsisch motiviert sind, weitere Optimierungen durchzuführen.

Nach Abschluss dieser zwölf Phasen des etablierten Kaizen Verfahrens ist der betrachtete Prozess mit großer Wahrscheinlichkeit optimiert und bildet nun den neuen Ist-Prozess der wiederum Grundlage für eine Optimierung sein kann. So etabliert sich ein ständiger Kreislauf der Prozessoptimierung, der es ermöglicht, stets an die sich wandelnden Umweltbedingungen und Anforderungen angepasst zu sein. Im Folgenden werden spezielle Methoden und Werkzeuge beschrieben, die im Rahmen einer oder mehrere Phasen des Kaizen Vorgehens angewendet werden können.



### 8.3.2 Methoden und Werkzeuge für die Anwendung von Kaizen

Die in Kapitel 8.3.1 für Phase 2 vorgeschlagene Durchführung von geführten Experten Workshops können unter Zuhilfenahme von verschiedenen Werkzeugen und Methoden optimiert werden. Um gemeinsam mit den Experten Quellen der Verschwendung zu erkennen oder Ursachen von Problemen zu identifizieren, gibt es im Rahmen der Kaizen Methode unter Anderem bestimmte Checklisten, die bei der Analyse helfen können. Ein geeignetes Beispiel für die Anwendung in Experten Workshops ist die **3-Mu-Checkliste** [111], welche nach drei japanischen Begriffen benannt ist:

- **Muda:** Verschwendung
- **Muri:** Überlastung
- **Mura:** Abweichung von Standards oder Regeln

Dabei werden diese drei Kategorien herangezogen, um systematisch nach den Quellen für Verschwendung oder nach Problemen in folgenden Bereichen zu suchen [111]:

- Mitarbeiter: fehlendes Wissen, schlechte Ausführung der jeweiligen Engineeringschritte
- Technik: inadäquate technische Ausstattung, z.B. unpassende Engineeringsoftware, Datenbrüche in der Toolkette, schlechte Datenqualität
- Methode: Prozessbeschreibungen (für einzelne Engineeringschritte) lückenhaft oder fehlerhaft, benötigte Dokumente unverständlich oder fehlerhaft
- Zeit: Projektplan für Anlage/Werk unklar, zu knapp, Wartezeit im Prozess, Verzögerung von Engineeringentscheidungen
- Möglichkeit: Gestaltungsspielraum für Anlagenprojekt unklar
- Vorrichtungen und Werkzeuge zur Umsetzung des Anlagenprojekts oder des einzelnen Engineeringschritts: ungenügend, defekt, fehlen

- Material (z.B. für Erstellung von Prototypen einzelner Komponenten oder ganzer Anlagen): fehlt, schlechte Qualität, hohe Lagerbestände
- Produktionsvolumen: Unterproduktion, Überproduktion (für Engineeringprozess weniger relevant)
- Transporte: überflüssig, zu lange Transportwege (für Engineeringprozess weniger relevant, außer im Sinne von Datenlogistik zwischen den Engineeringschritten)
- Umlauf: Bestände zu groß, Zu- und Abgänge nicht planbar (für Engineeringprozess weniger relevant)
- Platz: Der Arbeitsplatz des Ingenieurs (i. S. v. Datenablage, Dokumentation) ist unordentlich
- Bewegungsabläufe: unnötig, kompliziert (i. S. v. manuelle Nacharbeit aufgrund von Tool- oder Prozessbrüchen nötig)
- Art zu denken: keine Beachtung von Verbesserungen und Vermeiden von Verschwendung innerhalb des Engineerings

Eine weitere Checkliste zur Anwendung in Phase eins und zwei während der Experten-Workshops ist die **6W-Checkliste**. Dort werden Fragen vorgeschlagen, die ebenfalls zur detaillierten Analyse von Prozessen verwendet werden können. Grundlage und Namensgeber sind die sechs Fragewörter: Wer? Was? Wo? Wann? Warum? Wie? Damit können zum Beispiel folgende Fragen nach [111] verbunden sein:

- **Wer:** Wer macht es? Wer macht es gerade? Wer sollte es machen? Wer kann es noch machen? Wer soll es noch machen?
- **Was:** Was ist zu tun? Was wird gerade getan? Was sollte getan werden? Was kann noch gemacht werden? Was soll noch gemacht werden?
- **Wo:** Wo soll es getan werden? Wo wird es getan? Wo kann es noch getan werden? Wo sollte es noch getan werden?

- **Wann:** Wann wird es gemacht? Wann wird es wirklich gemacht? Wann soll es gemacht werden? Wann kann es sonst gemacht werden? Wann soll es noch gemacht werden?
- **Warum:** Warum macht der Mitarbeiter es? Warum soll es gemacht werden? Warum soll es hier gemacht werden? Warum wird es zu diesem Zeitpunkt gemacht? Warum wird es so gemacht?
- **Wie:** Wie soll es laut Plan gemacht werden? Wie wird es wirklich gemacht?

Da die Kaizen-Methode eine etablierte Möglichkeit zur Prozessverbesserung ist, gibt es in der Literatur zahlreiche Werkzeuge, die im Rahmen von Kaizen angewendet werden können. Dabei ist festzuhalten, dass in jedem zu transformierenden Bereich und den dazugehörigen Prozessen andere Werkzeuge optimal sein können und diese je nach Bedarf – auch in abgewandelter Form – verwendet werden können. Bei allen Werkzeugen ist es jedoch wichtig, diese an Engineeringprozesse anzupassen und wiederkehrend anzuwenden, sodass sich ein permanenter Zyklus der Verbesserung einstellt.

#### 8.4 Organisatorischer Change durch die sozial kognitive Theorie

Die Säule des organisatorischen Changes innerhalb der ganzheitlichen Transformationsstrategie ist diejenige, die in ihrer Vorgehensweise am flexibelsten an die Rahmenbedingungen im betrachteten Unternehmen angepasst werden muss. Jedes Unternehmen und jede Organisation sind geprägt durch Werte und Kultur, wodurch die Definition eines einheitlichen Vorgehens zu viele dieser Aspekte außer Acht lassen würde. Aus diesem Grund werden im Folgenden die Grundlagen der Theorie sozialen kognitiven Lernens [135] als Basis für die eigene Definition von Maßnahmen für organisatorischen Change erläutert. Außerdem werden einige konkrete Maßnahmen als Anhaltspunkte vorgeschlagen, welche sich durch die Anwendung der Methode als erfolgreich erwiesen haben. Zudem können weitere konkrete Maßnahmen und Werkzeuge aus der VDI Richtlinie 4499 [171] abgeleitet werden, welche in Kapitel 8.4.2 vorgestellt werden.

Im Vergleich zu traditionellem Lernen konzentriert sich die Theorie sozialen kognitiven Lernens nicht auf das Auswendiglernen, sondern auf folgende Aspekte:

### **1. Verstehen**

Damit kognitives Lernen effizient ist, müssen die betroffenen Personen den Grund verstehen, warum Sie ein bestimmtes Thema lernen oder begreifen sollen.

### **2. Gedächtnis**

Ein tiefes Verständnis eines Themas verbessert die Fähigkeit, neues Wissen mit früheren Erfahrungen oder Informationen zu verknüpfen.

### **3. Anwendung**

Kognitive Lernstrategien helfen, neue Informationen oder Fähigkeiten in der Praxis anzuwenden. Sie ermutigen die Personen, ihre Problemlösungsfähigkeiten weiterzuentwickeln.

Die Anwendung dieser drei Prinzipien mit dem Ziel des organisatorischen Wandels im Rahmen der ganzheitlichen Transformation wird im Folgenden erläutert.

#### **8.4.1 Beschreibung der Vorgehensweise mit der sozial kognitiven Theorie**

Drei Aspekte der sozial-kognitiven Theorie sind für den organisatorischen Bereich besonders relevant: Die Entwicklung der kognitiven, sozialen Verhaltenskompetenzen durch Modellierung, die Kultivierung des Glaubens an ihre Fähigkeiten, damit sie ihre Talente effektiv einsetzen, und die Steigerung der Motivation der Menschen durch Zielsysteme. [219]

Eine der wichtigsten Komponenten der sozialen kognitiven Theorie ist das Beobachtungslernen. Dabei handelt es sich um den Prozess des Lernens von erwünschten und unerwünschten Verhaltensweisen anderer durch Beobachtung. Eine Person, die das Verhalten einer anderen Person vorlebt, wird als Modell bezeichnet. Dabei kann es sich um reale Personen wie Lehrer, Gleichaltrige und Vorgesetzte

handeln oder um symbolische Modelle, auch bekannt als fiktive Figuren, die das Verhalten des Beobachters beeinflussen.

Um den organisatorischen Wandel im Rahmen der Transformation des Anlagenentstehungsprozesses zu begleiten, bietet sich das Rahmenwerk Guided-Mastery-Modelling [135] an, da dieses Modell bereits weit verbreitet ist und erfolgreich eingesetzt wird, um gezielt bestimmte erwünschte oder notwendige Kompetenzen innerhalb einer Organisation zu entwickeln. Das Modell besteht aus drei Hauptelementen:

- Modellierung: Die notwendigen Kompetenzen werden definiert und von den Vorgesetzten vorgelebt, da die Mitarbeiter so Methoden und Strategien erlernen können, die sie in bestimmten Situationen anwenden können sollen.
- Verbesserung: Die erlernten Kompetenzen werden zuerst in simulierten Situationen und Umgebungen angewendet (z.B. Rollenspiele, virtuelle Umgebungen, etc.). Anschließend bekommen die Mitarbeiter Feedback, was den zentralen Teil dieses Elements darstellt.
- Stabilisierung: Die erlernten Kompetenzen werden anhand eines Transfer-Programms stabilisiert, indem sie zuerst in einfachen realen Situationen und dann in zunehmend komplexen Szenarien angewendet werden müssen. Die Anwendung der Kompetenzen sollte dabei stets mit Erfolg belohnt werden, da der Zentrale Aspekts dieses Elements die Stärkung des eigenen Vertrauens in die neuen Fähigkeiten ist.

Die Erfolgsfaktoren dieses Modells liegen in erster Linie in einer positiven Selbsteinschätzung der Mitarbeiter hinsichtlich ihrer persönlichen Wirksamkeit, da dies den höchsten positiven Einfluss auf die langfristige Verbesserung der eigenen Fähigkeiten sowie auf die Steigerung der Motivation, diese auch einzusetzen, hat [219]. Dies ist besonders wichtig, da es von zentraler Bedeutung ist, dass die Mitarbeiter nicht nur neue Fähigkeiten, Kompetenzen und Denkmuster besitzen, sondern diese auch aktiv einsetzen.

Die Selbsteinschätzung der Mitarbeiter kann sowohl durch weitere persönliche positive Erfahrungen durch den Einsatz ihrer Kompetenzen verbessert werden als

auch durch das Beobachten von Vorbildern, welche ihre Fähigkeiten erfolgreich einsetzen. Je höher demnach das Bewusstsein der Mitarbeiter bezüglich ihrer eigenen Wirksamkeit ist, desto höher ist die Bereitschaft, die Fähigkeiten und Kompetenzen weiter zu perfektionieren und selbst zum Vorbild zu werden [220]. Auf diese Weise kann ein betrachteter Bereich im Unternehmen einen organisatorischen Wandel erfolgreich meistern.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die vorgeschlagene Theorie ein Rahmenwerk zur Einordnung psychologischer Mechanismen, sozialer Strukturen und deren Einfluss auf die Performance von Organisationen, die sich in einem Wandel befinden, bietet. Die soziale kognitive Theorie bietet konkrete Möglichkeiten, Menschen mit den nötigen Fähigkeiten, Denkmustern, Selbstbewusstsein und Resilienz auszustatten, um den organisatorischen Wandel zu meistern. [219]

Die konkrete Anwendung der Theorie, sowie deren Einbettung in die ganzheitliche Transformationsstrategie wird im folgenden Kapitel erläutert.

#### 8.4.2 Methoden und Werkzeuge für die Umsetzung organisatorischen Wandels

Der organisatorische Wandel stellt die volatilste Säule der ganzheitlichen Transformation dar, da dieser über viele verschiedene Wege erfolgen kann und aus teilweise unabhängigen Einzelmaßnahmen bestehen kann. Die optimale Definition des Maßnahmenpakets und der Strategie hin zu aktivem organisatorischem Wandel, der die Einführung durchgängigen digitalen Engineerings unterstützt, muss für jede Organisation oder sogar für jeden Bereich gesondert vorgenommen werden. Die im Folgenden beschriebenen Methoden und Werkzeuge bieten dazu eine Übersicht über mögliche Maßnahmen in Form eines Werkzeugkoffers.

Konkrete Maßnahmenvorschläge, die auch im Rahmen der ganzheitlichen Transformationsstrategie angewendet werden können, werden in der VDI Richtlinie 4499 [171] beschrieben, wobei der Fokus auf Hinweisen zur effizienten und effektiven Einführung der digitalen Fabrik liegt. In der Richtlinie werden verschiedene Möglichkeiten in drei Schritten (Vorbereitung, Konzepterstellung und Umsetzung)

beschrieben. Die für die vorliegende Arbeit und demnach den organisatorischen Wandel relevanten Punkte sind in Abbildung 52 gelb markiert. Die Elemente der sozialen kognitiven Theorie kommen dabei hauptsächlich im Rahmen der Mitarbeiterqualifikation und der Umsetzung organisatorischer Veränderungen zum Tragen. Die nicht markierten Punkte wurden bereits im Rahmen der technischen Migration und der Prozessoptimierung betrachtet.

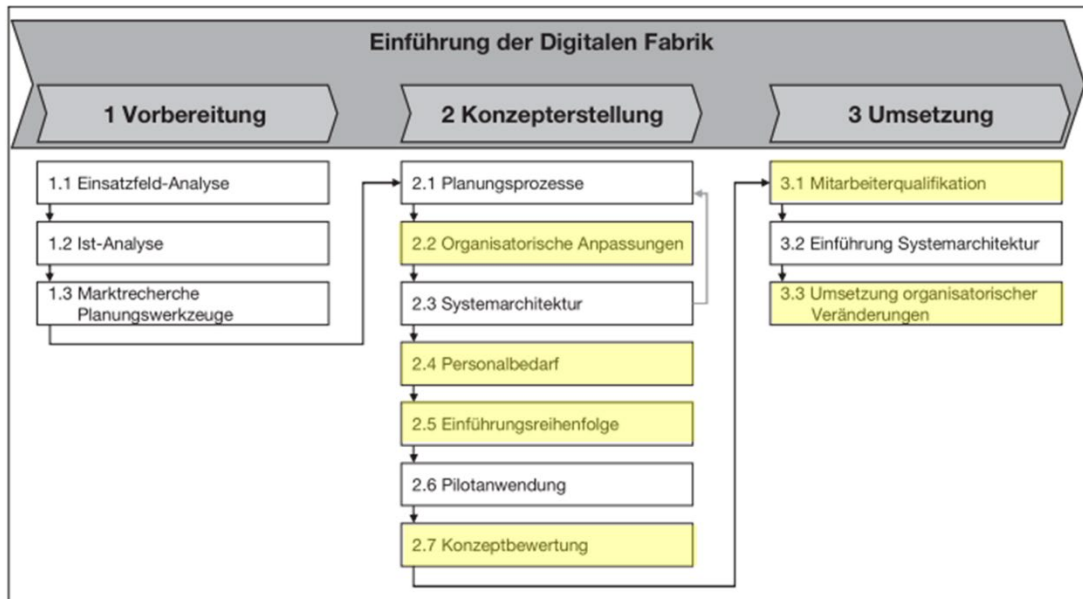


Abbildung 52: Maßnahmen aus VDI 4499 [171]

## Organisatorische Anpassungen

Um einen erfolgreichen organisatorischen Wandel herbeizuführen, müssen ggf. bestehende Bereichsstrukturen, Verantwortungsbereiche sowie Hierarchiestrukturen angepasst oder erweitert werden. Dabei ist ein möglicher Ansatz, eine Projektorganisation einzuführen, die nach den Grundregeln des Projektmanagements agiert. Das Projekt „Wandel zu durchgängigem digitalem Engineering“ ist als eine komplexe Aufgabe zu betrachten, die die Beteiligung verschiedenster Fachdisziplinen erfordert. [171]

Um die Projektorganisation aufzusetzen gibt es laut [171] zwei Organisationsformen:

Das Stabs-Projektmanagement kommt bei der Einführung der Digitalen Fabrik häufig zum Einsatz. Dabei bleibt die funktionale Hierarchie innerhalb der Primärorganisation des Unternehmens erhalten und wird nur um eine Stabsstelle, den Projektkoordinator, ergänzt. Dieses Vorgehen ist jedoch bei der Einführung der Digitalen Fabrik nicht zu empfehlen, da große Gefahren bezüglich einer mangelnden Akzeptanz des Projektleiters, verzögerter Entscheidungen und der Überlastung der Geschäftsleitung drohen. Der trotzdem hohe Verbreitungsgrad ist damit zu erklären, dass diese Organisationsform problemlos und ohne organisatorische Umstellung einzuführen ist.

Eine zweite Möglichkeit stellt die Einführung eines neuen zentralen Funktionsbereichs innerhalb des Unternehmens dar, in welchen die an der Projektdurchführung beteiligten Mitarbeiter und alle für das Projekt benötigten materiellen Kapazitäten gebündelt werden. Diese Organisationsform stellt die nachhaltigste Anpassung an die Anforderungen zur Einführung der digitalen Fabrik und damit auch durchgängigen digitalen Engineerings dar. Die beteiligten Ressourcen werden vollumfänglich dem Projekt gewidmet, wodurch sowohl die Motivation als auch das Verantwortlichkeitsgefühl steigen. Zusätzlich zu den mitarbeiterbezogenen Vorteilen gibt es organisatorische Potenziale, wie die eindeutige Weisungsbefugnis, die konfliktfreie Koordinationsarbeit und die schnelle Reaktionsmöglichkeit auf Störungen im Projekt.

In beiden Organisationsformen ist eine Maßnahme, wie aus den Kapiteln 6.4 und 7.1 abgeleitet werden kann, von zentraler Bedeutung. In jedem Fall müssen Verantwortlichkeiten für Daten, Datenqualität und Datengovernance entlang der gesamten Organisation klar definiert werden. Außerdem müssen die zugehörigen Aufgabenbereiche und Kompetenzen eindeutig beschrieben sein und dementsprechend gelebt werden.

### **Personalbedarf**

Nach erfolgreicher Umsetzung der beiden Säulen Prozess und Technik in Form von Prozessoptimierungen und der Einführung einer neuen IT-Architektur ist eine fundierte Mitarbeiterauswahl im Rahmen des organisatorischen Wandels



erfolgsentscheidend. Laut [171] empfiehlt es sich, auf Mitarbeiter zurückzugreifen, die bereits über Erfahrungswissen im Umgang mit digitalen Werkzeugen verfügen. Durch die ganzheitliche Transformationsstrategie können Routineaufgaben oder nicht-wertschöpfende Tätigkeiten (teil-)automatisiert werden, mit dem Ziel schneller, genauer, detaillierter und gleichzeitig kostengünstiger als bisher zu arbeiten.

Organisatorischer Veränderungen und die damit verbundene Veränderung des Aufgabenbereichs einzelner Mitarbeiter, Verantwortungs- und Machtwechsel müssen klar definiert sein und transparent kommuniziert werden. Dies wirkt sich stark auf die Bereitschaft aus, sich auf Veränderung bisher vertrauter Planungsprozesse und Arbeitsschritte einzulassen. Die Beteiligten entwickeln im Optimalfall ein intrinsisches Interesse an der eigenen Fort- und Weiterbildung zur Anwendung der Methoden, Modelle und Werkzeuge im Kontext durchgängigen digitalen Engineerings. [171]

Als konkrete Maßnahmen im Rahmen der Definition des Personalbedarf ist auch die Einführung neuer Rollen zu nennen. In vielen Unternehmen gibt es heute schon Data Stewards. Die Aufgaben des Data Stewards reichen von der Identifikation relevanter Daten und Datenquellen über die Analyse der Qualität der Daten und Metadaten bis hin zur Definition von Geschäftsobjekten, welche für den Datenaustausch verwendet werden [221]. Der Data Steward sollte im Zuge der Transformation hin zu durchgängigem digitalem Engineering als Experte für die Modellierung der übergreifenden Anlagen-Datenmodelle eine zentrale Rolle übernehmen. Aufgaben, Verantwortlichkeiten und Anforderungen an einen Data Steward können in [222] nachgelesen werden.

### **Einführungsreihenfolge**

Wie bereits in Kapitel 8.2 beschrieben, stellen neue Technologien sowie eine geeignete IT-Architektur die zentralen Befähiger für durchgängiges digitales Engineering dar. Für eine erfolgreiche Umsetzung einer ganzheitlichen Transformationsstrategie ist hierfür aber nicht nur die technische Realisierung von Bedeutung, sondern auch die optimale Art und Weise, diese auch tatsächlich in die tägliche Arbeit der Ingenieure zu integrieren. Dazu ist eine nachhaltige Einführungsstrategie notwendig. Hilfreich ist es, sich bei der Einführungsreihenfolge

an den „neuen“, optimierten Planungsprozessen zu orientieren und eine Priorisierung der Komponenten vorzunehmen [171]. Der Startpunkt ist von besonderem Interesse, da zu Beginn eine Pilotanwendung oder ein Pilot-Anwendungsfall festgelegt wird, die als Maßstab für das Gesamtprojekt dienen.

### **Pilotanwendung**

Die Auswahl eines geeigneten Pilotprojektes zur Einführung der Methoden und Werkzeuge digitalen Engineerings konzentriert sich zu Beginn auf wenige Unternehmensfunktionen oder Bereiche (z. B. Karosserierohbau und Endmontage oder Layoutplanung). Die gewählten Bereiche wenden im besten Fall bereits digitale Werkzeuge in der Planung an und haben zumindest teilweise objektorientierte Daten vorliegen. So können aufwendige Datenaufbereitungen vermieden werden, wodurch die Mitarbeiter nicht ihre Motivation verlieren. [171]

Besonders wichtig – auch im Rahmen der Anwendung der sozialen kognitiven Theorie – ist die gezielte und frühzeitige Einbindung von Mitarbeitern der entsprechenden Fachabteilungen. Während des Aufbaus und der Durchführung dieser Pilotanwendung erfolgt ein kontinuierlicher Wissensaufbau bei den Mitarbeitern durch geeignete Schulungsmaßnahmen (vgl. folgender Abschnitt).

### **Mitarbeiterqualifikation**

Für die Umsetzung und Einführung durchgängigen digitalen Engineerings im Rahmen einer ganzheitlichen Transformation ist das Verständnis aller Beteiligten über das Ziel und die Gesamtzusammenhänge unbedingt erforderlich. Nur ein umfassendes Verständnis der Zusammenhänge sowie das Vertrauen in die eigenen Fähigkeiten und Kompetenzen (vgl. soziale kognitive Theorie) kann bei den Beteiligten die intrinsische Motivation herbeiführen, die nötig ist, um aktiv die Veränderungen mitzugestalten und zu leben. [171]

Die verschiedenen Ebenen im Unternehmen haben aber auch unterschiedliche Bildungsbedarfe, wie in Abbildung 53 dargestellt ist. Die Logik der Bildungsbedarfspyramide folgt der bekannten „WHY–HOW–WHAT“-Logik nach [223]. Demnach benötigen alle Mitarbeiter, auch die betroffenen Führungskräfte, Basis-

Wissen und müssen verstehen, warum die Einführung durchgängigen digitalen Engineerings ein zentraler Erfolgsfaktor für die Zukunft sein wird. Ein Beispiel für eine Basisausbildung mit dem Fokus auf die Entstehung und Verwendung von digitalen Zwillingen bietet die Fraunhofer Academy [224] oder das Fraunhofer IPK mit dem Fokus auf durchgängiges digitales Engineering [225]. Viele weitere Anbieter von Schulungen und Coachings haben bereits Angebote diesbezüglich im Portfolio und können beim Design von Lernpfaden unterstützen. Die nächste Stufe in der Bildungsbedarfspyramide stellen die Anwender von digitalen Werkzeugen in ihren jeweiligen Bereichen dar. Die Schulungen in diesem Kontext gehen demnach etwas weiter in die Tiefe und setzen sich mit Details des digitalen Engineerings auseinander. Ein Beispiel für Schulungen auf dieser Ebene ist das Ausbildungsprogramm zum 3D Layoutplaner [226], welches sich auf Aspekte digitalen Engineerings im Rahmen der Layoutplanung beschäftigt. Die oberste Ebene der Pyramide beinhaltet schließlich die Schulungen mit dem höchsten Detailgrad, welche nur für spezialisierte Anwender notwendig sind. Ein Beispiel dafür sind Experten-Tool-Schulungen jeglicher Art, z. B. die Durchführung einer virtuellen Inbetriebnahme mit digitalen Zwillingen mit dem Tool WinMOD [227].

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klima geförderten Projekts „DIAMOND“ wird eine Bildungsmatrix für alle am Anlagenentstehungsprozess beteiligten Rollen entwickelt, welche zukünftig als Grundlage für die Definition der unternehmensspezifischen Lernpfade herangezogen werden kann [73].

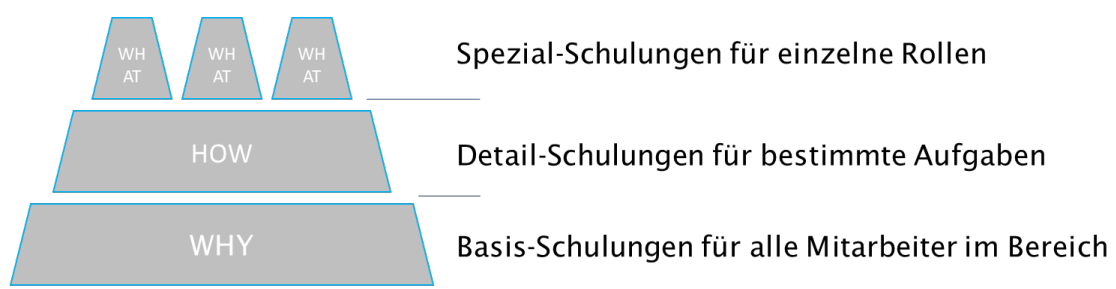


Abbildung 53: Schulungskonzept

Ein weiteres Werkzeug im Rahmen der Mitarbeiterqualifizierung kann ein digitaler Lernassistent sein, der beispielsweise in der Lage ist, zu erkennen, welche Fähigkeiten die Mitarbeiter bereits haben und auf Basis dessen vorzuschlagen, was sie als

Nächstes lernen sollten. Dieser Lernassistent kann die Mitarbeiter entlang ihrer individuellen Lernpfade begleiten und so das gesamte Maßnahmenpaket zur Mitarbeiterqualifikation unterstützen und entsprechend der sozialen kognitiven Theorie nachhaltig entwickeln.

### **Umsetzung organisatorischer Veränderungen**

Im Rahmen der ganzheitlichen Transformationsstrategie spielen viele organisatorische Aspekte, wie z.B. die Kultur, Anreizsysteme oder die Personalauswahl eine Rolle. Bei der erfolgreichen Umsetzung der Transformationsstrategie inklusive der Prozessanpassungen und einer aktualisierten Systemarchitektur kann die Modifikationen der Organisationsstruktur unterschiedlich ausfallen. Die Definition des optimalen Maßnahmenpakets wird im besten Fall auch unter Beachtung der Fragebogen-Ergebnisse vorgenommen. Ein potentes Werkzeug für die Unterstützung der Einführung durchgängigen digitalen Engineerings aus organisatorischer Sicht ist die Bündelung verschiedener Experten in übergreifenden Gremien. Die verschiedenen Experten, wie Layoutplaner, Prozessplaner, Anlagenplaner sowie Logistikplaner, können sich bspw. im Rahmen von Fachkreisen konkret zum Thema durchgängiges digitales Engineering austauschen und dort gemeinsam die gegenseitigen Anforderungen, nötigen Prozessanpassungen sowie die gemeinsame Roadmap diskutieren. Die Ergebnisse dieser Gespräche können wiederum in das iterative Vorgehen der Prozessoptimierung oder in Bebauungsuntersuchungen einfließen. Entsprechend der sozialen kognitiven Theorie ist es wichtig, dass Führungskräfte und andere Vorbilder den Zielzustand intensiv vorleben. Aus diesem Grund kann es sinnvoll sein, als regelmäßige Teilnehmer des Fachkreises auch Führungskräfte zu integrieren.

### **8.5 Zusammenfassung der ganzheitlichen Transformationsstrategie**

Die Ganzheitlichkeit der vorgestellten Transformationsstrategie zeigt sich in erster Linie dadurch, dass die einzelnen Aspekte und Maßnahmen der Säulen Technik, Prozess und Organisation stets miteinander interagieren, indem Informationen und Erkenntnisse in alle Richtungen fließen (s. Abbildung 54) und die Entscheidungen innerhalb der Säulen beeinflussen können. Die in Abbildung 54 dargestellten

ausgetauschten Informationen entsprechen dem aktuellen Kenntnisstand, haben aber keinen Anspruch auf Vollständigkeit und können bei Bedarf jederzeit um weitere Informationen ergänzt werden.

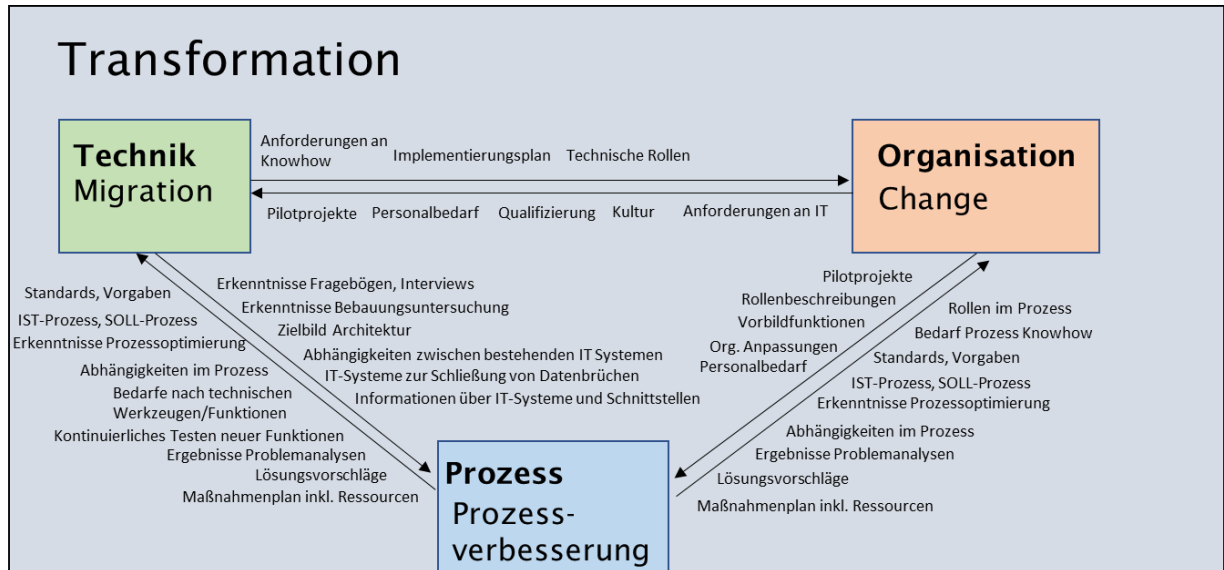


Abbildung 54: Informationsaustausch zwischen den Säulen

Dieser iterative und integrative Ansatz ermöglicht es, stets globale Optima zu identifizieren und maximale Transparenz über die Zusammenhänge zu erlangen. In der vorliegenden Arbeit wird ein Rahmenwerk sowie eine Methodenliste für die Anwendung der ganzheitlichen Transformationsstrategie vorgeschlagen. In der Realität lässt sich in jedem betrachteten Unternehmen eine individuelle Situation vorfinden, was dazu führt, dass die Transformationsstrategie ggf. angepasst werden muss. Aus diesem Grund ist die Anwendung des Digital Orchestra Framework zu Beginn von zentraler Bedeutung, da auf diese Weise die aktuelle Situation sowie die Ziel-Situation des Unternehmens oder des betrachteten Bereichs definiert werden kann. Auf Basis dieser Ergebnisse können die geeigneten Werkzeuge zusammengestellt werden. Dieses Vorgehen wird im folgenden Kapitel anhand eines konkreten Beispiels dargestellt.

## 9 Anwendung des definierten Ansatzes am Beispiel des Anlagenentstehungsprozesses bei einem Automobilhersteller

Das gewählte Beispiel betrachtet den konkreten Planungsprozess bei einem Automobilhersteller. Nach Anwendung der ganzheitlichen Transformationsstrategie wird abschließend erneut die VDI-Richtlinie 3695 [10] angewendet, um resultierenden Verbesserungen anhand der Qualitätslevel zu bewerten, um dadurch RQ6 zu beantworten. Die Anwendung der definierten Transformationsstrategie verfolgt das Ziel, die Gesamtmethode zu validieren.

### 9.1 Technische Migration mit PERFoRM+

#### 9.1.1 Phase „Vorbereitung“

Nach Kapitel 3.1 und 8.2 ergeben sich aus der Phase der Vorbereitung Transparenz über die aktuelle Situation sowie über die langfristige Vision der Migration für den betrachteten Engineeringprozess. Zu diesem Zweck wird der in Kapitel 8.2.2 entwickelte Fragebogen angewendet.

In diesem Rahmen werden verschiedene Personen aus den folgenden Hauptorganisationsbereichen befragt:

- Leiter physische Logistik, Produktion E-Antriebe
- Dev-Ops Spezialist Produktionsplanung
- Projektleiter virtuelle Fabrik
- Domain Owner Produktionssystemplanung
- Leiter Gesamtstrategie "Digitaler Zwilling" in der Planung
- Spezialist digitale Planung
- Leiter Digitales Anlagenmodell und virtuelle Inbetriebnahme
- Produkt und Prozessplaner (Karosseriebau)

Das aggregierte Ergebnis der Befragung ist in Abbildung 55 dargestellt. Die Detailergebnisse befinden sich im Anhang (Anhang F).

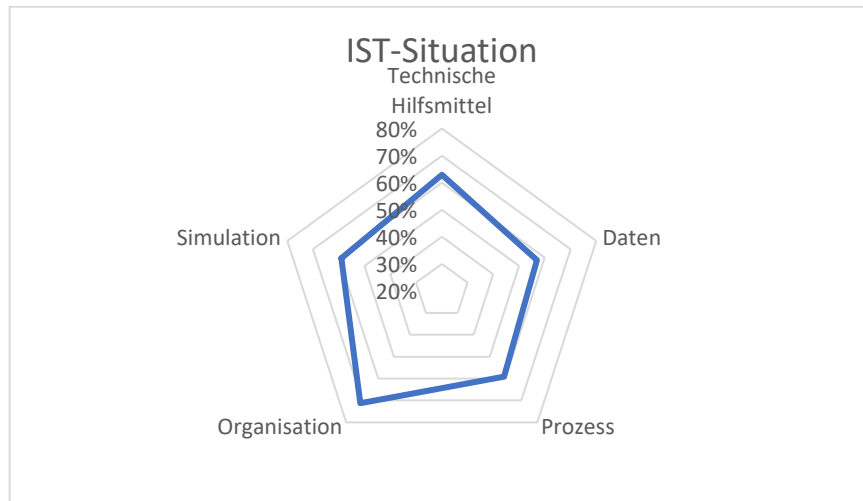


Abbildung 55: Ergebnis Befragung für Phase 1 des PERFoRM+ Ansatzes

Basierend auf diesen Ergebnissen werden anschließend Stärken und Schwächen des Engineeringprozesses identifiziert, um daraus die Migrationsmatrix zu erstellen. Die während des Interviews gesammelten Antworten beziehen sich dabei auf einen Reifegrad, der zwischen 1 und 5 liegen kann. In Anlehnung an [24] werden die Aspekte, die mit einem Reifegrad 1 oder 2 bewertet werden, als Schwächen, und diejenigen mit Stufe 4 oder 5 als Stärken gewertet. Ein Reifegrad 3 kann je nach Kontext als Stärke oder Schwäche bewertet werden. Die Stärken können Tabelle 8 entnommen werden, die Schwächen Tabelle 9.

Hauptkategorie	Beschreibung	Durchschnittlicher Reifegrad
Technische Hilfsmittel	Hardwareausstattung	4
Prozess	Layoutplanung	3,6
Prozess	übergreifendes Vorgehensmodell für Engineeringprozesse	4,25
Organisation	übergreifenden Verantwortlichkeiten für die digitale Transformation	3,6
Simulation	Einsatz spezieller Simulationstools im Engineering	3,75

Tabelle 8: Stärken der Ausgangssituation

Hauptkategorie	Beschreibung	Durchschnittlicher Reifegrad
Technische Hilfsmittel	Planungsvarianten oder -versionen in Planungstools	2

Daten	einheitliches und übergreifendes Datenmodell für die Beschreibung von Anlagen bzw. Ressourcen	2,375
Daten	einheitliches und übergreifendes Datenmodell für die Kopplung zwischen Produkt, Prozess und Ressource	2,375
Daten	Datenverfügbarkeit in der frühen Planungsphase	2
Prozess	übergreifendes Vorgehensmodell für projektunabhängige Tätigkeiten	2,25
Prozess	Risikomanagement	2,375
Simulation	Optimierung der Produktion mithilfe von Simulationstools während der Planungsphase	2,125

*Tabelle 9: Schwächen der Ausgangssituation*

Wie Tabelle 8 zu entnehmen ist, ist aktuell das übergreifende Vorgehensmodell für Engineeringprozesse die größte Stärke. Dieser Punkt ist innerhalb der technischen Dimension ein prozessualer Aspekt. Die positive Bewertung ist dadurch begründet, dass laut den durchgeführten Interviews im betrachteten Unternehmen für jeden Schritt des Engineeringprozesses ein detailliertes Vorgehensmodell sowohl textuell als auch in einer Prozessmodellierungssprache beschrieben ist. Diese Vorgehensmodelle werden regelmäßig durch Expertenkreise verifiziert und validiert und wenn nötig angepasst. Außerdem gibt es regelmäßige Initiativen zur Optimierung der Vorgehensmodelle. Dieser Aspekt stellt in den Augen der Befragten einen sehr großen Mehrwert für den Engineeringprozess dar und stellt sicher, dass der definierte und der gelebte Prozess übereinstimmen und einer kontinuierlichen Verbesserung unterliegen. Außerdem stellt die technische Ausstattung eine große Stärke im betrachteten Unternehmen dar, da laut den Befragten jeder Planer seine Hardwareausstattung selbst wählen kann und somit sicherstellen kann, dass alle Anforderungen erfüllt sind. Auch die Ausstattung mit Simulationstools kann laut den Befragten als Stärke betrachtet werden, da für jeden Engineeringsschritt Simulationstools verwendet werden können. Laut den Experten ist die Simulation von diversen Engineeringergebnissen während der Planungsphase ein Aspekt, der im betrachteten Unternehmen als herausragend im Vergleich zu anderen Unternehmen betrachtet wird. Eine weitere Stärke liegt in der organisatorischen Umsetzung im



Kontext der digitalen Transformation. Die technische Migration wird demnach unterstützt durch klare, übergreifende Verantwortlichkeiten (z.B. durch die Einführung von Data Stewards inkl. Expertengremien). Abschließend schätzen die Experten auch die technische Unterstützung für die Layoutplanung als Stärke ein, da die heute verwendeten Tools schon viele Funktionen haben, welche für eine mögliche Zielbebauung im Kontext durchgängigen digitalen Engineerings wichtig sind.

Für die technische Migration im Rahmen des PERFoRM+ Ansatzes können die identifizierten Stärken ein wichtiger Anhaltspunkt sein für weitere Optimierungen oder als Ankerpunkte verwendet werden, die heute schon dem Zielzustand entsprechen. Für die Definition der ersten Migrationsschritte sind die Schwächen, welche im Folgenden beschrieben werden, wichtigere Indikatoren.

Die größte durch die Befragten identifizierte Schwäche ist die Datenverfügbarkeit in der frühen Planungsphase. Demnach können Planer nicht auf alle für ihre Arbeit notwendigen Daten und Informationen zugreifen und erleben dadurch erhebliche Verzögerungen im Prozess. Die mangelnde Datenverfügbarkeit kann verschiedene Gründe haben, z. B. Daten sind nicht vorhanden oder nicht interpretierbar. Die Planer verwenden häufig viel Zeit, um die Daten manuell zu sammeln oder starten ihren Prozess mit Informationslücken, was wiederum zu unnötigen Schleifen führen kann. Eine weitere Schwäche, die durch die Befragten als gleichwertig bewertet wurde, ist das Fehlen von Möglichkeiten zur Abbildung und Verwaltung von Planungsvarianten oder -versionen in Planungstools. Dies verhindert eine konstante und durchgängige Transparenz über den aktuellen Stand des Planungsprojekts und zieht wiederum manuellen Aufwand zur Informationsbeschaffung oder Doppelarbeit nach sich. Eine weitere Schwäche identifizieren die Planer in der nicht vorhandenen Möglichkeit zur Optimierung der Produktionsprozesse (z. B. Taktzeit) mithilfe von Simulationstools während der Planungsphase. Diese Funktion kann einen erheblichen Beitrag zur Effizienzsteigerung der Produktion leisten, wird aber heute aufgrund fehlender technischer Möglichkeiten nicht eingesetzt. Außerdem kostet ein fehlendes übergreifendes Vorgehensmodell für projektunabhängige Tätigkeiten viel Zeit und verlangsamt den Gesamtprozess durch aufwändige und nicht standardisierte Begleitprozesse (z. B. Kapazitätsplanung, Budgetplanung, etc.). Durch die Einführung solcher

Vorgehensmodelle könnten die Planer laut den Experten stark entlastet werden und die Qualität des Gesamt-Prozesses würde zunehmen. Eine weitere Schwäche im Zusammenhang mit prozessualen Gegebenheiten ist das Fehlen eines strukturierten Ansatzes zum Risikomanagement im Planungsprojekt. Laut den Befragten handhabt jeder Projektleiter dies unterschiedlich und in Abhängigkeit von Faktoren wie Zeit und verfügbarer Ressourcen. Abschließend können zwei Schwächen aus dem Bereich der Datendurchgängigkeit identifiziert werden. Zum einen fehlt laut den Experten ein einheitliches und übergreifendes Datenmodell für die Kopplung zwischen Produkt, Prozess und Ressource und zum anderen ein einheitliches und übergreifendes Datenmodell für die Beschreibung von Anlagen bzw. Ressourcen. Dies führt dazu, dass heute keine reelle Objektorientierung oder Datendurchgängigkeit entlang der Toolkette umgesetzt werden kann, da es kein gemeinsames Datenmodell gibt, das von allen unterstützt wird. Außerdem führt dies zu vielen manuellen Prozessen, da Planer Daten aus Vorgänger-Tools für die Verwendung in ihrem Tool aufbereiten müssen.

Die beschriebenen Schwächen können als Ausgangspunkt für die Definition des ersten Migrationsschrittes verwendet werden. In diesem Zusammen liegt es nahe, sich zuerst die aktuell größten Schwächen anzusehen und zu entscheiden, ob diese sich als Basis für einen ersten Migrationsschritt eignen. Die mangelnde Datenverfügbarkeit in der frühen Phase sowie die fehlende Möglichkeit zur Abbildung und Verwaltung von Planungsvarianten und -versionen stellen dabei eine gute Option dar, da alle Planer von diesen Problemen betroffen sind und eine Verbesserung dieser beiden Aspekte zu einem insgesamt stabileren, effizienteren und transparenteren Engineeringprozess führt.

Der erste Migrationsschritt besteht demnach darin, eine technische Möglichkeit für die Abbildung und Verwaltung von Planungsvarianten und -versionen sowie für die Ablage von Daten in der frühen Phase zu schaffen.

Die langfristige Vision der gesamten technischen Migration adressiert alle identifizierten Schwächen und resultiert in der Realisierung einer IT-Architektur, die

durchgängiges digitales Engineering sowohl technisch als auch prozessual vollumfänglich unterstützt.

#### 9.1.2 Phase „Untersuchung der Optionen“

In der zweiten Phase des PERFoRM+ Ansatzes (in Anlehnung an [24]) werden verschiedene Optionen für die Durchführung des ersten Migrationsschrittes untersucht und bewertet. Auf Basis der Ergebnisse des Fragebogens kann die in Kapitel 8.2.2 vorgestellte Migrationsmatrix als visuelles Tool befüllt werden. Dadurch wird ersichtlich, dass vor allem der Aspekt der fehlenden Standard-Bibliotheken ein Problem bei der Migration zum durchgängigen digitalen Engineering darstellt. Die anhand eines klassischen Brainstorming Ansatzes unter Beachtung der Migrationsmatrix (

Durchgängiges digitales Engineering					
Dimensionen	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5
<b>Technik</b>	Technische Hilfsmittel				
	Datendurchgängigkeit				
	Objektorientierung				
<b>Prozess</b>	Standardisierung von Vorgehensmodellen				
	Verfügbarkeit von Standard-Bibliotheken				
	Verzahnung Planungsprozess und Betrieb				
<b>Organisation</b>	Verfügbarkeit von Simulationsmodellen				
	Vorhandensein von Know-how				
Definition von übergreifenden Verantwortlichkeiten					

Abbildung 56) sowie der restlichen Ergebnisse des Fragebogens identifizierten Optionen lauten:

- Option 1: Implementierung einer zentralen Datendrehscheibe inkl. standardisiertem Datenmodell, Bibliotheken und Datenaustauschformat zur Abbildung und Verwaltung von Planungsvarianten und -versionen sowie für die Ablage von Daten in der frühen Phase

- Option 2: Definition von standardisierten Ablageorten für Daten der frühen Phase sowie Definition einer Benamungskonvention für Planungsvarianten und -versionen

Durchgängiges digitales Engineering

Dimensionen	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5
<b>Technik</b>	Technische Hilfsmittel				
	Datendurchgängigkeit				
	Objektorientierung				
<b>Prozess</b>	Standardisierung von Vorgehensmodellen				
	Verfügbarkeit von Standard-Bibliotheken				
	Verzahnung Planungsprozess und Betrieb				
<b>Organisation</b>	Verfügbare von Simulationsmodellen				
	Vorhandensein von Know-how				
Definition von übergreifenden Verantwortlichkeiten					

Abbildung 56: Migration Matrix am Beispiel

Für die Bewertung der Optionen werden die Kriterien aus Kapitel 8.2.1 nach [214] herangezogen, wobei jedes Kriterium eine der folgenden Ausprägungen annehmen kann: advanced (3 Punkte), medium (2 Punkte), low (1 Punkt). Die Ergebnisse der vergleichenden Bewertung sind in Tabelle 10 dargestellt.

<b>Bewertungskriterien</b>	<b>Option 1</b>	<b>Option 2</b>
Benutzerfreundlichkeit	advanced	medium
Reifegrad	medium	medium
Automatisierung	advanced	low
Integrität	advanced	medium
Nutzen	medium	medium
Substitution	advanced	low
Verfügbarkeit	medium	advanced
Potenzial	advanced	low
Robustheit	advanced	medium
Sicherheit	advanced	medium
Industrie 4.0	advanced	medium
<b>Gesamt</b>	<b>30</b>	<b>20</b>

*Tabelle 10: Bewertung und Vergleich der Optionen im realen Beispiel*

Auf Basis der vergleichenden Bewertung kann abschließend festgehalten werden, dass Option 1 klar zu bevorzugen ist. Die Ausdetaillierung dieser Option wird im folgenden Kapitel beschrieben.

### 9.1.3 Phase „Design“

In dieser Phase erfolgt die Detaillierung der Option „Implementierung einer zentralen Datendrehscheibe inkl. standardisiertem Datenmodell, Bibliotheken und Datenaustauschformat zur Abbildung und Verwaltung von Planungsvarianten und -versionen sowie für die Ablage von Daten in der frühen Phase“ anhand einer Bebauungsuntersuchung (vgl. Kapitel 8.2.2) im betrachteten Unternehmen. In Abbildung 57 ist eine vereinfachte Darstellung der Ergebnisse der Bebauungsuntersuchung abgebildet. Daraus ist zu entnehmen, dass eine zentrale Datendrehscheibe (Common Data Management) erforderlich ist, welche in der Lage ist, ein Gesamtdatenmodell der Anlage durch kontinuierliches Anreichern des digitalen Abbilds zu erstellen. Dazu müssen alle Planungssysteme mithilfe eines standardisierten Datenaustauschformates (z. B. AutomationML) angebunden werden und durch die Verwendung eines einheitlichen Bezeichnungskonzeptes kompatible Datenmodelle verwenden. Für die Zusammenarbeit der verschiedenen Disziplinen im Anlagenentstehungsprozess ist ein Frontend der Kollaborationsplattform notwendig, das z. B. in einer 3D Umgebung alle relevanten Engineeringdaten visualisiert. Außerdem ist die Anreicherung des Datenmodells um Daten aus der Produktion (z. B.

Energieverbrauch von Vergleichsanlagen, Verfügbarkeiten, Taktzeiten, etc.) ein wichtiger Aspekt im definierten Zielbild.

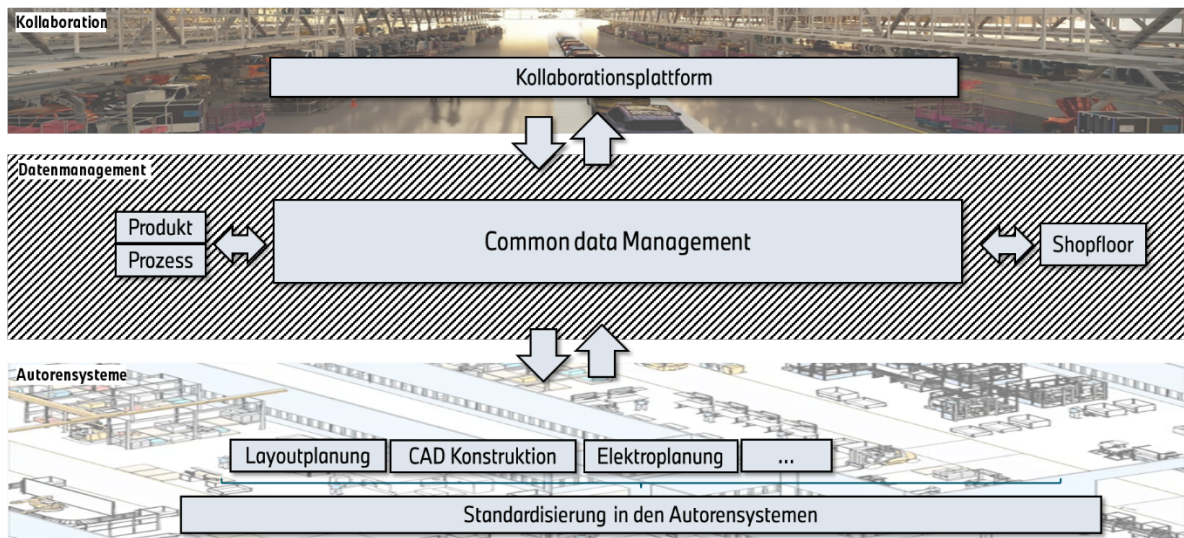


Abbildung 57: Vereinfachte Darstellung der Ergebnisse der Bebauungsuntersuchung

Die detaillierten Ergebnisse der Bebauungsuntersuchung sind in Anhang XX dargestellt. Diese Bebauungsuntersuchung wurde im betrachteten Unternehmen so bestätigt und zur Umsetzung beauftragt.

#### 9.1.4 Phase „Implementierung“

Die Phase der Implementierung konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit im betrachteten Unternehmen nicht final umgesetzt werden, da die Implementierung einer Datendrehscheibe ein langfristiges Projekt ist, welches auf Basis der Bebauungsuntersuchung nun angestoßen wird. Parallel zur Implementierung der Datendrehscheibe wird im betrachteten Unternehmen das vom BMWK geförderte Projekt „DIAMOND“ [73] aktiv begleitet mit dem Ziel, ein branchenübergreifendes Datenmodell mit zugehörigem Datenaustauschformat zu entwickeln. Die Datendrehscheibe wird dieses Datenmodell sowie das Datenaustauschformat unterstützen. Weiterhin erfolgt die Umsetzung der Datendrehscheibe entsprechend den Anforderungen, die aus der Bebauungsuntersuchung resultieren (vgl. Anhang D – Ergebnis Bebauungsuntersuchung). Der Projektplan sieht aktuell vor, dass die Datendrehscheibe in einem Zeitraum von 5 Jahren entwickelt wird und auf alle



Bereiche und Standorte des Unternehmens ausgerollt wird. Zu Beginn des Projekts werden Proof of Concepts mit kleineren Umfängen durchgeführt, um die optimale IT-Infrastruktur zu identifizieren.

Eine prozessuale und organisatorische Klärung, welche Daten aus der frühen Phase wann bereitgestellt werden müssen, erfolgt parallel in Abstimmung mit den relevanten Stakeholdern. Die technische Basis für die Bereitstellung der Daten wird im Rahmen der Entwicklung der Datendrehscheibe abgedeckt.

Zusätzlich ist die Entwicklung eines Datenmodells mit dedizierten Attributen für das Management von Varianten und Versionen in der Planung notwendig. Dazu erfolgt die Etablierung eines Fachkreises bestehend aus Data Stewards und Vertretern aus allen Planungsdisziplinen zur gemeinsamen Definition des Datenmodells. Die Datendrehscheibe muss dieses Datenmodell dann unterstützen und entsprechend die konsistenten Planungsstände abbilden und aufbauen können.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Gestaltung der technischen Migration anhand des PERFoRM+ Ansatzes durch das gewählte Beispiel validiert werden kann. Der Ansatz hilft dabei, eine Priorisierung der Migrationsschritte vorzunehmen sowie strukturiert zur optimalen Gesamtlösung zu kommen. In der Realität würde der Migrationsvorgang nicht an dieser Stelle enden, sondern sich mit dem nächsten Migrationsschritt abgeleitet von der Migrationsmatrix befassen. Für die vorliegende Arbeit konnte bewiesen werden, dass das Vorgehen nach PERFoRM+ im Rahmen der ganzheitlichen Transformationsstrategie hin zu durchgängigem digitalem Engineering geeignet ist und erfolgreich angewendet werden kann.

## 9.2 Prozessuale Optimierung

Das Vorgehen zur prozessualen Optimierung wurde für die vorliegende Arbeit bereits zur Definition des Ist- und Soll-Prozesses in den Kapiteln 6.1 und 7.1 angewendet und auf Basis der dadurch gewonnenen Erkenntnisse für die Verwendung innerhalb der ganzheitlichen Transformationsstrategie validiert. Im Folgenden werden die einzelnen Phasen des Ansatzes und deren Anwendung am konkreten Beispiel nochmal

zusammengefasst. Die Ergebnisse der Anwendung sind detailliert in den Kapiteln 6 und 7 beschrieben.

#### Phase 1. Arbeitsbereich festlegen und abgrenzen

Für die vorliegende Arbeit wurden von den Prozessexperten [206] drei separate und in sich geschlossene Anwendungsbereiche für die Prozessoptimierung definiert. Die im Kontext durchgängigen digitalen Engineerings relevanteste Anwendung findet im Bereich des Anlagenentstehungsprozesses des betrachteten Unternehmens statt. Für weitere Optimierungsschleifen wurden zudem Sub-Cluster innerhalb der Anwendungsbereiche definiert, die separat detaillierter betrachtet wurden.

#### Phase 2. Ist- und Soll-Zustand beschreiben

Wie in Kapitel 6 beschrieben, wurde der Ist-Prozess im Rahmen von geführten Workshops mit Experten aus jeder Sparte des betrachteten Bereichs erhoben. Für die Definition des Soll-Prozesses wurden gemeinsam mit den Experten Zielzustände definiert, die dann nach Durchführung der Phasen drei, vier und fünf in einen konkreten Vorschlag für einen Soll-Prozess überführt wurden. Die Ergebnisdarstellung der Erhebung des Ist-Prozesses ist in Kapitel 6 nachzulesen, sowie die Ergebnisdarstellung des definierten Soll-Prozesses in Kapitel 7.

#### Phase 3. Probleme beschreiben

Auf Basis des identifizierten Ist-Prozesses konnten verschiedene Arten von Problemen bzw. Verschwendung abgeleitet werden. Wie in Kapitel 6.1.2 beschrieben, werden im Rahmen der nach Kaizen durchgeführten Verschwendungsanalyse von den Teilnehmern insgesamt 97 Schwächen bzw. „Muda“ genannt. Diese Schwächen lassen sich grob in die folgenden vier Kategorien einteilen:

- Mangelnde Datenverfügbarkeit (hinsichtlich Qualität, Datenaustausch und Datenaktualität)
- Schwächen im Prozess oder der Organisation (z. B. Wartezeiten oder Schnittstellenthematiken)
- Fehlende oder nicht gelebte Standardisierung

- Probleme mit den Planungstools (z. B. fehlende Durchgängigkeit)

Dieses Vorgehen wird in [74] im Detail beschrieben und wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit speziell für den Prozessschritt „virtuelle Inbetriebnahme“ im Detail durchgeführt. Die Ergebnisse belegen, dass die größte Quelle für Verschwendung in diesem Prozessschritt daraus resultiert, dass die Generierung und Verwendung falscher Daten und Informationen oder Fehlinterpretationen dieser zu falschen Ergebnissen führen, die durch den Einsatz zusätzlicher Ressourcen korrigiert werden müssen [74].

#### Phase 4. Probleme analysieren

Im Anschluss wurden die identifizierten Probleme weiter analysiert und priorisiert, wodurch eine Umsetzungsreihenfolge für Optimierungsmaßnahmen abgeleitet werden konnte. Die Ergebnisse belegen, dass die beiden Probleme „Schwächen im Prozess“ sowie „mangelnde Datenverfügbarkeit“ die größten Quellen der Verschwendung darstellen und demnach auch den größten Hebel für Optimierung darstellen (vgl. Abbildung 39).

#### Phase 5. Lösungsideen entwickeln

Auf Basis der Erkenntnisse können nun Lösungsideen für die identifizierten Probleme entwickelt werden. Dazu wurde ein Vorgehen wie in Kapitel 6.4 angewendet, woraus die Umsetzungspfade (vgl. Kapitel 7.1) entstanden sind, welche die Basis für den Soll-Prozess bilden. Die für den betrachteten Bereich definierten Optimierungspotenziale sind in Tabelle 4 in Kapitel 6.4 beschrieben.

#### Phase 6. Lösungen bewerten und auswählen

Nachdem die Definition des Soll-Prozesses erfolgt ist, wurden die Lösungspfade und damit verbundene notwendige Maßnahmen hinsichtlich des damit verbundenen Aufwand-/Nutzenverhältnisses bewertet. Dazu wurden im betrachteten Beispiel alle notwendigen Maßnahmen hinsichtlich ihres Aufwands, des erwarteten Nutzens sowie ihres aktuellen Umsetzungsstandes bewertet und in Arbeitspakete einsortiert.

Anschließend wurden die Arbeitspakete verantwortlichen Personen zugeordnet, die sich seitdem mit der Umsetzung befassen.

#### Phase 7. Maßnahmen ableiten

Die verantwortlichen Personen haben je Arbeitspaket einen Maßnahmenplan inklusive eines Terminplans erarbeitet, um die zielgerichtete Umsetzung entsprechend der ganzheitlichen Transformation optimal zu begleiten. Ebenso wurden die nötigen Ressourcen (monetär und personell) aufgebaut. Ein Beispiel für einen konkreten Maßnahmenplan, der im Rahmen des betrachteten Projekts entstanden ist, ist der Projektplan für die Umsetzung der Datendrehscheibe (vgl. Kapitel 9.1).

#### Phase 8. Ergebnisse der Analyse präsentieren

In dieser Phase wurden alle Ergebnisse inkl. des priorisierten Umsetzungsplans und der dafür nötigen Ressourcen sowie der Implikationen auf die Säulen Technik und Organisation kommuniziert. Dabei wurden unter anderem auch der konkrete Projektplan für die Umsetzung der Datendrehscheibe kommuniziert sowie die Ergebnisse der Bebauungsuntersuchung (vgl. Kapitel 9.1.3).

#### Phase 9. Maßnahmen vereinbaren und Ressourcen klären

Die bestätigten Maßnahmen sowie die dafür notwendigen Ressourcen werden anschließend konkret ausgeplant, indem personelle Ressourcen benannt werden, finanzielle Ressourcen bereitgestellt werden und die ersten Schritte zur Umsetzung der Maßnahmen geplant und eingeleitet werden. Im betrachteten Beispiel der Datendrehscheibe als Enabler für durchgängiges digitales Engineering befindet sich die prozessuale Optimierung aktuell in dieser Phase.

#### Phase 10. Maßnahmen umsetzen

Die Maßnahmen können nun entsprechend dem Umsetzungsplan umgesetzt werden. Dazu ist im betrachteten Beispiel bereits eine Anbieterauswahl für die Umsetzung der Datendrehscheibe erfolgt. Die anhand einer Marktanalyse ausgewählten potenziellen Anbieter haben zudem bereits kleine Umfänge in Form eines Proof of Concepts (POC)

umgesetzt, um ihre Eignung als Projektpartner zu validieren. Im nächsten Schritt erfolgt die Projektvergabe an einen der Anbieter und anschließend die Umsetzung.

#### Phase 11. Erfolg prüfen

Nach Abschluss der ersten Maßnahmen (im Beispiel kann der Abschluss der POC-Phase betrachtet werden) wurde regelmäßig überprüft, ob das gewünschte Ergebnis in Hinblick auf die Prozessverbesserung durch die Umsetzung unterstützt wird. Dazu wurden im Beispiel der Datendrehscheibe Experten befragt, indem ihnen die Lösungen der einzelnen Anbieter gezeigt wurden, woraufhin in Form einer Bewertungsmatrix der Erfüllungsgrad der Lösungen bewertet wurde. Daraufhin konnten zwei potenzielle Anbieter aus dem weiteren Projektverlauf ausgeschlossen werden. Die verbleibenden Lösungen wurden für gut befunden und werden für die weitere Umsetzung in Betracht gezogen.

#### Phase 12. Ergebnis weiter verbessern

Das iterative Vorgehen spielt in der gesamten ganzheitlichen Transformationsstrategie eine wichtige Rolle. Im betrachteten Beispiel ist es daher ein etablierter Ansatz, dass sämtliche Stakeholder zu Review und Refinement Terminen (vgl. [228]) eingeladen werden und dort Feedback geben können oder Anforderungen einsteuern.

Nach Betrachtung der prozessualen Optimierung anhand des definierten Ansatzes im Rahmen der ganzheitlichen Transformation zu durchgängigem digitalem Engineering am konkreten Beispiel, kann festgestellt werden, dass die beschriebenen Phasen sehr gut geeignet sind, um eine reale Verbesserung im Prozess zu erzielen. Da es sich beim betrachteten Beispiel um ein Projekt handelt, welches auf einen Zeitraum von fünf Jahren ausgelegt ist, kann für die vorliegende Arbeit nicht abschließend anhand von Kennzahlen ermittelt werden, welche konkrete Verbesserung im Prozess (z. B. Verkürzung der Durchlaufzeit) aus den Maßnahmen resultiert. Nach Abschluss der POC-Phase für die Umsetzung der Datendrehscheibe wurde erneut eine Befragung der Experten durchgeführt [206]. Die Experten sollten dabei abschätzen, wie stark sich die Umsetzung der Datendrehscheibe auf ihren Prozess auswirkt. Dabei konnte

festgestellt werden, dass sich der gesamte Engineeringprozess dadurch um vier Wochen verkürzen lässt, der einzelne Planer pro Jahr durchschnittlich halb so viel Zeit für die Generierung von virtuellen Modellen braucht und sich die Gesamtqualität des Prozesses um 36 Prozentpunkte verbessert. Diese Ergebnisse sind in Abbildung 58 dargestellt.

VORHER						NACHHER																	
Zeit		0-5T 5-10T 10-20T 20-30T 30-40T >40T				Qualität		-- - 0 + ++				Zeit		0-5T 5-10T 10-20T 20-30T 30-40T >40T				Qualität		-- - 0 + ++			
Planer AT/Jahr	0-1W	2-4W	4-6W	6-8W	8-10W	8-12W	Änderungszeiten Planung (Pkt. Time)	+	0	-	--	0-1W	2-4W	4-6W	6-8W	8-10W	8-12W	Änderungszeiten Planung (Pkt. Time)	+	0	-	--	
	PI Bedarf						+	0	-	--	PI Bedarf						+	0	-	--			
Durchlaufzeit Prozess	0-1W	2-4W	4-6W	6-8W	8-10W	8-12W	Strukturaufbau Anlauf (Gradier)	+	0	-	--	0-1W	2-4W	4-6W	6-8W	8-10W	8-12W	Strukturaufbau Anlauf (Gradier)	+	0	-	--	
	Output Prozess (NA Produkt)						+	0	-	--	Output Prozess (NA Produkt)						+	0	-	--			

Abbildung 58: Prozessverbesserung nach Umsetzung der Datendrehscheibe

Zusammenfassend lässt sich demnach sagen, dass der definierte Ansatz zur prozessualen Optimierung im Rahmen der ganzheitlichen Transformationsstrategie durch das betrachtete Beispiel validiert werden kann.

### 9.3 Organisatorischer Change

Die Anwendung der sozial kognitiven Theorie im Rahmen der ganzheitlichen Transformationsstrategie zu durchgängigem digitalem Engineering zur Erreichung von organisatorischem Change besteht im betrachteten Beispiel aus der Definition von neuen Rollen sowie deren benötigten Kompetenzen. Die Entscheidung für diese Priorisierung basiert auf den Ergebnissen des Fragebogens, die klar auf den Bedarf nach klaren Rollen und Verantwortungen im Rahmen der Digitalisierung hindeuten. Auf Basis dessen wird exemplarisch ein Lernpfad für eine der Rollen abgeleitet und angewendet.

Die drei Phasen der sozial kognitiven Theorie werden wie folgt im Beispiel umgesetzt:

**Modellierung:** Neue Rollen werden auf Basis des optimierten Prozesses sowie der migrierten IT-Landschaft definiert. Die notwendigen Kompetenzen werden abgeleitet und anhand von Lernpfaden an die Rollen vermittelt. Für die vorliegende Arbeit werden die beiden in Kapitel 9.2 identifizierten größten Quellen für Verschwendung

als Basis für die Definition der neuen Rollen herangezogen, um so das größtmögliche Potenzial für Verbesserung zu schaffen. Um den beiden Problemen „Schwächen im Prozess“ sowie „mangelnde Datenverfügbarkeit“ entgegenzuwirken, werden zukünftig die beiden neuen Rollen „Data Steward“ [221, 222] (vgl. Kapitel 8.4.2) sowie „Digital Engineer“ zentrale Aufgaben im Prozess übernehmen. Der „Digital Engineer“ übernimmt dabei die Verantwortung, den gesamten Engineeringprozess zu begleiten und sicherzustellen, dass alle digitalen Artefakte kontinuierlich zu einem Digitalen Zwilling angereichert werden. Im betrachteten Beispiel wird zu Vereinfachungszwecken lediglich der „Data Steward“ weiter beleuchtet. Der „Data Steward“ ist nicht direkt dem Engineeringprozess zugeordnet, sondern übernimmt eine übergreifende Funktion mit dem Ziel, die Datenqualität sowie die Datenverfügbarkeit und Datendurchgängigkeit End-to-End sicherzustellen. Dazu definiert er Datenmodelle und Vorgaben zum Datenaustausch.

Im betrachteten Beispiel wurde von einer übergreifenden Stelle im Unternehmen, die für die Definition unternehmensweiter Organisationsstrukturen und Verantwortungsbereiche zuständig ist, festgelegt, dass der „Data Steward“ verantwortlich ist für folgende Aspekte:

Als Eigentümer eines oder mehrerer Datenbestände innerhalb des Engineeringprozesses ist er

- verantwortlich für das Datenmanagement (effiziente Erfassung, Verarbeitung, semantische Verknüpfung und Wartung) dieser Ressourcen.
- Verantwortlich für die Sicherstellung der Qualität (Genauigkeit und Vollständigkeit), inhaltlichen Konsistenz und Verfügbarkeit der Datenbestände gegenüber allen Prozesspartnern.
- Verantwortlich für die Umsetzung der zentralen Governance-Richtlinien (Daten- und Informationsschutz, Datenspeicherung) für die Datenbestände.

Um diesen Verantwortungen gerecht zu werden, wurden im betrachteten Beispiel von oben genannter übergreifender Stelle folgende Kompetenzen für den „Data Steward“ definiert:

- Kompetenz zur Definition von Informationsklassifizierungen, Datenschutzerfordernungen und Kennzeichnung kritischer Daten innerhalb des Datenbestands. Kritische Daten liegen vor, wenn diese nach ISO 27001 [229] mindestens hohen Schutzbedarf haben.
- Kompetenz zur Bewertung spezifischer Informationsklassifizierungen, die sich aus der Kombination verschiedener Datenbestände ergeben (auch in Abstimmung mit anderen Data Stewards)
- Kompetenz zur Festlegung von daten- und informationsschutzbezogenen oder regulatorischen Beschränkungen und Maßnahmen in Bezug auf die Bereitstellung, Speicherung und weitere Nutzung des Datenbestands.
- Kompetenz zur Modellierung übergreifender Datenmodelle zur Beschreibung von Ressourcen im Produktionssystem.

Daraus abgeleitet werden folgende zentrale Aufgaben des „Data Stewards“:

- Erfassung, Verarbeitung, semantische Verknüpfung und Kuration von Datenbeständen in Zusammenarbeit mit der Konzern-IT (einschließlich der technischen Architektur für die Datenerfassung)
- Dokumentation des Datenbestands und der entsprechenden Meta- und Stammdaten innerhalb des Datenkatalogs
- Definition und Dokumentation von Maßnahmen gemäß der Datenschutz-Folgenabschätzung (Datenschutz) und der Informationsklassifizierung (Informationssicherheit) für die Speicherung, Bereitstellung, Aufbewahrung und weitere Nutzung des Datenbestands
- Sicherstellung der Anwendung der lokalen Compliance-Vorschriften für den Datenbestand, die in den länderspezifischen Gesetzen vorgesehen sind
- Weiterentwicklung des Data Assets durch Priorisierung und Definition von Akzeptanzkriterien für neue Data Asset-Anforderungen von Business und IT
- Beratung von Datenwissenschaftlern, Geschäftsanalysten und anderen Prozesspartnern bei der Interpretation und Nutzung des Datenbestands sowie anderer inhaltsbezogener Datenanfragen (z. B. Geschäftskontext, Attribute, Quellsysteme)



- Identifizierung von technischen Ansprechpartnern für bestimmte Daten-/Quellsysteme innerhalb des Datenbestands
- Definition von Spezifikationen für eingehende und ausgehende Schnittstellen (Ingest und Egress) sowie die Vorverarbeitung des Datenbestands

Zur internen Ausbildung zum „Data Steward“ wurde auf Basis der beschriebenen Verantwortungen, Kompetenzen und Aufgaben der folgende Lernpfad unter Berücksichtigung der unternehmensspezifischen Leitfäden, Strukturen, Tools etc. definiert:

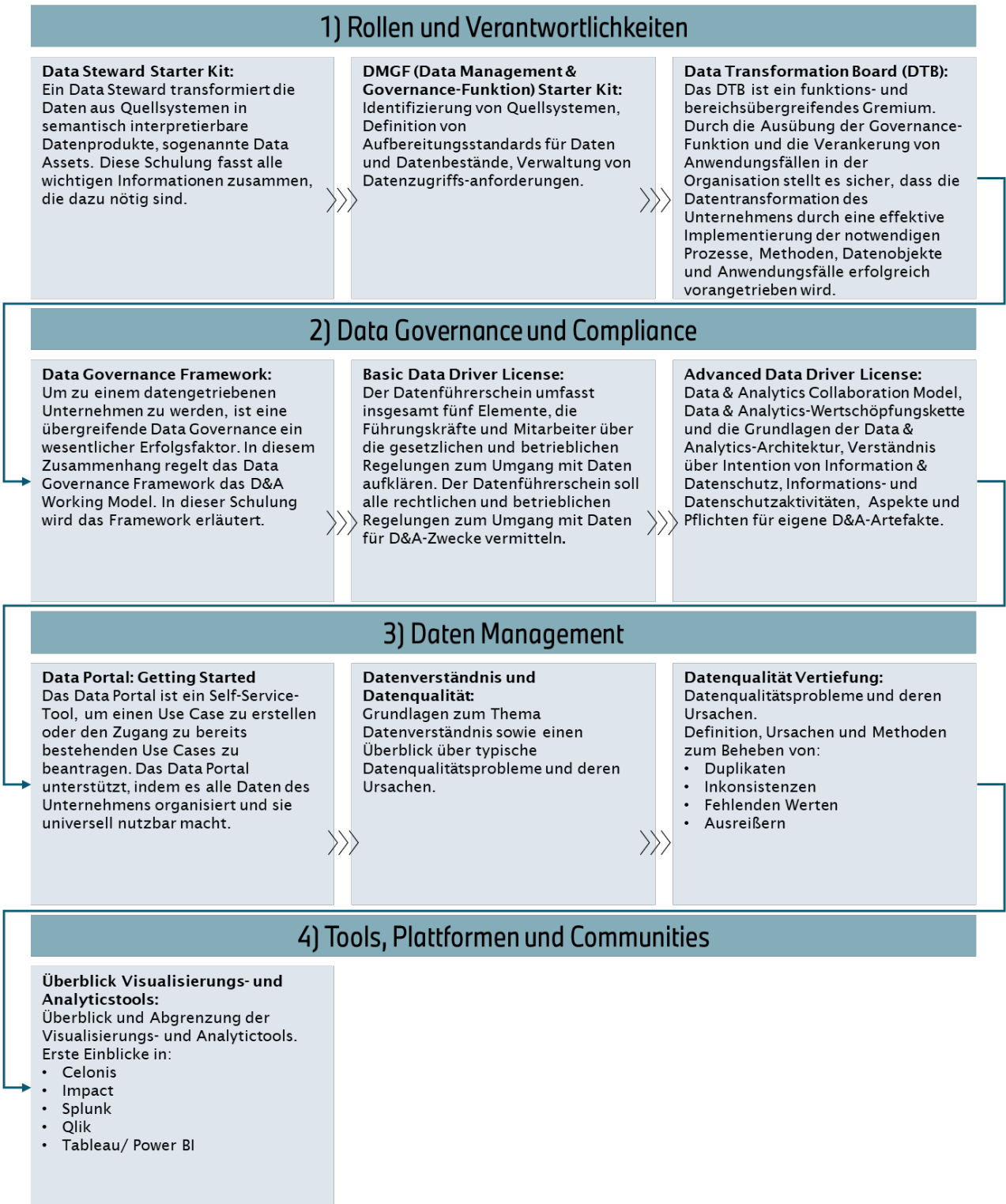


Abbildung 59: Lernpfad Data Steward am betrachteten Beispiel

Gemäß den in Kapiteln 3.3.6 und 8.4 beschriebenen Phasen, kann deren Umsetzung folgendermaßen beschrieben werden.

**Verbesserung:** Die anhand des Lernpfades erlernten Kompetenzen werden zuerst in simulierten Situationen und Umgebungen angewendet (im Beispiel anhand eines simulierten Prozessschrittes im Rahmen der Lernpfade). Anschließend können die Mitarbeiter sowohl Feedback geben als auch erhalten, um die Qualifizierungen zukünftig noch weiter zu optimieren. Im betrachteten Beispiel wurde dazu im unternehmensinternen Data Portal eine Testumgebung eingerichtet, in der Test-Daten verwaltet werden können, Geschäftsobjekte modelliert werden können und Datenanalysen durchgeführt werden können. In regelmäßigen Feedbackterminen hatten die Mitarbeiter die Möglichkeit, ihre Testprojekte zu präsentieren und Feedback von Experten dazu zu bekommen.

**Stabilisierung:** Dieser Schritt kann nur bedingt im betrachteten Beispiel stattfinden, da eine Stabilisierung von neuen Kompetenzen bei neuen Rollen, besonders in sehr großen Unternehmen oder Konzernen, Jahre dauern kann. Dementsprechend werden im betrachteten Beispiel Maßnahmen zur Stabilisierung definiert. Dies wird anhand eines Transfer-Programms erfolgen, indem die betroffenen Mitarbeiter zuerst in einfachen realen Situationen und dann in zunehmend komplexen Szenarien die Chance zur Anwendung ihrer Fähigkeiten bekommen. Zudem bekommen neue „Data Stewards“ erfahrene Kollegen zur Seite gestellt, die ihnen bei der Stabilisierung ihrer Kompetenzen helfen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Anwendung der sozial kognitiven Theorie im Kontext der ganzheitlichen Transformationsstrategie insbesondere bei der Ausbildung notwendiger Kompetenzen wirksam wird. Für einen ganzheitlichen Change im Engineeringprozess ist die reine organisatorische Betrachtung demnach nicht ausreichend, viel mehr muss diese immer im Dreiklang mit der technischen und prozessualen Änderung erfolgen. Denn nur wenn für die Mitarbeiter die technischen und prozessualen Voraussetzungen erfüllt sind, kann ein ganzheitlicher Change inklusive organisatorischem Change im Kontext des Engineeringprozesses wirksam werden. Durch das betrachtete Beispiel und dem

damit verbundenen Aufbau der Rolle des „Data Steward“ wird dennoch gezeigt, dass das Vorgehen zur Erreichung organisatorischen Changes im Rahmen der ganzheitlichen Transformationsstrategie valide ist. Für einen langfristigen Change muss dieses Vorgehen permanent wiederholt werden und an die sich verändernden Rahmenbedingungen angepasst werden.

#### 9.4 Bewertung der Anwendung

Abschließend wird die angewendete Transformationsstrategie anhand des in Kapitel 4.5 beschriebenen Vorgehens zur Bewertung von Engineeringprozessen validiert, indem die erreichten Qualitätslevel vor und nach der Anwendung der ganzheitlichen Transformationsstrategie erhoben und verglichen werden. Die Ergebnisse dieses Vergleichs sind in Tabelle 11 dargestellt.

<b>Merkmal [179]</b>	<b>Zielzustand</b>	<b>Qualitätslevel vorher</b>	<b>Qualitätslevel nachher</b>
Wertschöpfungsprozess- übergreifend genutzte Informationsmodell	Gewerkeintegration und - durchgängigkeit [202]	A (Stufe 1 von 3)	C (Stufe 3 von 3)
Erstellung und Nutzung von Werkzeugketten	Wiederverwendbarkeit [202]	A (Stufe 1 von 5)	D (Stufe 4 von 5)
	Durchgängigkeit der Werkzeugkette [203]	B (Stufe 2 von 4)	D (Stufe 4 von 4)
	Spezifische Engineering Werkzeuge [203]	A (Stufe 1 von 2)	B (Stufe 2 von 2)
Verwendung einer einheitlichen Syntax und Semantik	Beschreibungsmittel [202]	A (Stufe 1 von 4)	C (Stufe 3 von 4),nach Abschluss des

			DIAMOND Projekts [73] wird D erreicht
gemeinsames Vorgehensmodell	Vorgehensmodell für Projektstätigkeiten	B (Stufe 2 von 4)	D (Stufe 4 von 4)
	Vorgehensmodell für projektunabhängige Tätigkeiten) [204]	A (Stufe 1 von 3)	B (Stufe 2 von 3)

*Tabelle 11: Bewertung der Anwendung der ganzheitlichen Transformationsstruktur anhand VDI 3695 Zielzustandsmodell*

Vor Anwendung der ganzheitlichen Transformationsstrategie lag das Qualitätslevel des Aspekts **Gewerkeintegration und –durchgängigkeit** [204] bei A (Stufe 1 von 3), da im Ist-Prozess (vgl. Kapitel 6.2) die Gewerke in der Planung während des gesamten Prozesses unabhängig voneinander arbeiten, wobei es aber innerhalb der Gewerke bereits Durchgängigkeit gibt. Im Zielprozess erreicht dieser Aspekt das Qualitätslevel C (Stufe 3 von 3), da die Gewerke auf Basis eines gemeinsamen Referenzmodells schon während der frühen Phase interdisziplinär zusammenarbeiten, was im Rahmen der Soll-Prozess Definition (vgl. Kapitel 7.1) modelliert wurde und eine Grundlage für die in Kapitel 9.1 entwickelte Datendrehscheibe bildet.

Der Aspekt der **Wiederverwendbarkeit** [204] wird vor Anwendung der Transformation mit A (Stufe 1 von 5) bewertet, da die Mitarbeiter Artefakte erkennen, die bereits in früheren Projekten verwendet wurden und versuchen, diese wiederzuverwenden. Im Zielbild nach Anwendung der Transformation erreicht dieser Aspekt das Qualitätslevel D (Stufe 4 von 5), indem Referenzmodelle definiert wurden, auf deren Basis systematisch wiederverwendbare Artefakte im Planungsprozess generiert werden können. Dies wurde im Rahmen der Soll-Prozess Definition (vgl. Kapitel 7.1) modelliert und stellt eine Aufgabe der im Rahmen des organisatorischen Wandels neu definierten Rolle „Data Steward“ (vgl. Kapitel 9.3) dar.

Für die **Durchgängigkeit der Werkzeugkette** [205] wird im Ist-Zustand das Qualitätslevel B (Stufe 2 von 4) erreicht, weil Planungsdaten einer Anlage bereits als auswertbare Daten vorliegen, Arbeitsabläufe dokumentiert und etabliert sind. Nach Durchführung der ganzheitlichen Transformationsstrategie wird der Aspekt mit Qualitätslevel D (Stufe 4 von 4) bewertet, da Planungsdaten einer Anlage bei Änderungen automatisch und elektronisch zwischen den Tools entsprechend den Arbeitsschritten ausgetauscht werden. Dies wurde im Rahmen der Soll-Prozess Definition modelliert (vgl. Kapitel 7.1) und im Rahmen der Bebauungsuntersuchung für die IT-Zielarchitektur (vgl. Kapitel 9.1.3) festgelegt.

Vor Anwendung der Transformationsstrategie befinden sich die **Spezifischen Engineering Werkzeuge** [205] auf Qualitätslevel A (Stufe 1 von 2). Die eingesetzten Engineering Werkzeuge entsprechen dem aktuellen Stand der Technik und stehen in einer aktuellen Version zur Verfügung. Im Zielbild wird Level B (Stufe 2 von 2) erreicht, indem die eingesetzten Engineering Werkzeuge dem aktuellen Stand der Technik entsprechen, in einer aktuellen Version zur Verfügung stehen und die Mitarbeiter zudem dafür geschult werden. Dies wird erreicht, indem die IT-Zielarchitektur vorsieht, dass alle IT-Systeme dem Stand der Technik entsprechen und immer in der aktuellen Version vorliegen. Außerdem wird im Rahmen des Lernpfades zur neuen Rolle „Digital Engineer“ (vgl. Kapitel 9.3) definiert, dass die entsprechenden Mitarbeiter für diese Tools geschult)

Im Kontext der **Beschreibungsmittel** [204] wird der Engineeringprozess vor der Transformation mit A (Stufe 1 von 4) bewertet, da die Anlagenmodelle während des Engineeringprozesses bereits mithilfe von strukturierten Beschreibungssprachen erstellt werden. Nach Anwendung der Transformationsstrategie wird Qualitätslevel C erreicht (Stufe 3 von 4) und zusätzlich kann nach Abschluss des DIAMOND Projekts [228] D erreicht werden. Für Level C existiert ein einheitlicher Modellierungskodex innerhalb der Organisation, dessen Definition Teil der Aufgaben des „Data Steward“ (vgl. Kapitel 9.3) ist und eine Basis für die Datendrehscheibe (vgl. Kapitel 9.1.3) darstellt. Nach Abschluss des Förderprojekts DIAMOND [73] kann der gesamte Lebenszyklus der Anlage anhand übergreifend standardisierter Beschreibungssprachen modelliert werden.

Das **Vorgehensmodell für Projektstätigkeiten** [204] kann im Ist-Zustand mit Qualitätslevel B (Stufe 2 von 4) bewertet werden. Das existierende Vorgehensmodell kann demnach innerhalb definierter Grenzen an das aktuelle Projekt angepasst werden oder es existieren geeignete Varianten für verschieden geartete Projekte. Nach Durchführung der ganzheitlichen Transformation wird Qualitätslevel D (Stufe 4 von 4) erreicht, da das existierende Vorgehensmodell innerhalb definierter Grenzen an das aktuelle Projekt angepasst werden kann oder es existieren geeignete Varianten für verschieden geartete Projekte gibt und zudem wird das Vorgehensmodell (oder seine Varianten) mit der Zeit systematisch weiterentwickelt. Dies findet im Rahmen der ganzheitlichen Transformationsstrategie statt, indem eine iterative Weiterentwicklung des Soll-Prozesses inklusive der Vorgehensmodelle ein fester Bestandteil der prozessualen Optimierung ist.

Für das **Vorgehensmodell für projektunabhängige Tätigkeiten** [206] erhält der Engineeringprozess vor der Transformation das Qualitätslevel A (Stufe 1 von 3), da nur die reine Existenz eines Vorgehensmodells für projektunabhängige Tätigkeiten gegeben ist. Durch die Durchführung der Transformationsstrategie kann Level B (Stufe 2 von 3) erreicht werden, indem das in Zielzustand A definierte Vorgehensmodell kontinuierlich gepflegt und optimiert wird. Dies erfolgt im Rahmen der Definition des Soll-Prozesses durch die Optimierung und Weiterentwicklung der begleitenden Prozesse. An diesem Punkt ist allerdings noch Potenzial zur weiteren Verbesserung, indem ein strukturiertes Vorgehensmodell für die Optimierung aller begleitender Prozesse und projektunabhängiger Tätigkeiten definiert werden kann. Dies ist allerdings nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit und kann als Anhaltspunkt für zukünftige Forschung betrachtet werden. Ein vielversprechender Beitrag im Kontext Optimierung projektunabhängiger Tätigkeiten mit dem Fokus auf Risikomanagement wird in [230] dargestellt.

## 10 Zusammenfassung und Ausblick

Die vierte industrielle Revolution zwingt Hersteller dazu, ihre derzeitigen Produktionssysteme bereits in der Planungsphase mit neuen digitalen Technologien zu verbessern. In diesem Zuge müssen Hersteller im Rahmen ihrer digitalen Transformation bei der Identifizierung einer geeigneten Transformationsstrategie unterstützt werden, um das bestmögliche Ergebnis mit optimalem Ressourceneinsatz zu erreichen.

In dieser Arbeit wurde ein schrittweiser und ganzheitlicher Ansatz vorgestellt, der auf die Transformation von Anlagen-Engineeringprozessen hin zu durchgängigem digitalem Engineering zugeschnitten ist.

Nachdem erörtert wurde, wie sich die Produktionssysteme sowie die zugehörigen Planungsprozesse durch die vierte industrielle Revolution sowie den Einsatz von digitalen Zwillingen verändern und welche Auswirkungen diese Änderung innerhalb einer Organisation haben können, wurde in Kapitel 2.3.4 eine Reihe von erforderlichen Merkmalen für eine Transformationsstrategie abgeleitet.

Auf der Grundlage dieser Anforderungen folgte in Kapitel 3 eine Literaturübersicht zu bestehenden Migrationsstrategien und -prozessen sowie zu Strategien zur Prozessoptimierung und zu organisatorischen Change-Prozessen. Diese Übersicht wird ergänzt um einen Literaturüberblick zu bestehenden Transformationsstrategien mit ganzheitlichen Ansätzen. Der Vergleich der jeweiligen Ansätze mit den oben genannten Merkmalen führt abschließend zu der Auswahl einer Transformationsstrategie als Rahmenwerk, welches für die drei Dimensionen Technik, Prozess und Organisation die zugehörigen Optimierungsstrategien umspannt und eine konsequente Ausrichtung der Dimensionen an einem Gesamtziel ermöglicht.

Die in Kapitel 4 beschriebenen Engineering-Prozesse wurden betrachtet, um die zugrundeliegenden Prozesse zur Planung von Produktionssystemen zu verdeutlichen und die Bewertungslogik der VDI-Richtlinie 3695 vorzustellen.



Ausgehend von der Analyse des Stands der Technik wurde im folgenden Kapitel 5 die zentralen Forschungsfragen der vorliegenden Arbeit beschrieben.

Anhand der erzielten Ergebnisse können die Forschungsfragen wie folgt beantwortet werden. Die Antwort auf **RQ1** (Dimension Prozess – Wie verändert sich der Engineeringprozess von Produktionssystemen durch durchgängiges digitales Engineering?) erfolgt durch den Vergleich des gelebten Prozesses (beschrieben in Kapitel 6) mit dem abgeleiteten Ziel-Prozess (beschrieben in Kapitel 7). Die Abweichungsübersicht ist in Kapitel 7.4 dargestellt und kann dahingehend zusammengefasst werden, dass folgende Effekte durch die Prozessoptimierung erreicht werden können: Höhere Softwarequalität, bessere Prozess-Absicherung, höherer Standardisierungsgrad, bessere Transparenz, Verkürzung der Gesamt-Durchlaufzeit. Zusammengefasst kann demnach festgehalten werden, dass die Datenqualität durch durchgängiges digitales Engineering erhöht wird und der gesamte Prozess effektiver und effizienter wird. Dabei ist zu betonen, dass die Verkürzung der Gesamt-DLZ als stärkster Effekt auftritt, welcher je nach Komplexität des Anlagenprojekts stärker oder schwächer ausfallen kann.

**RQ2** (Dimension Technik – Welche Auswirkungen sind auf Datenmodelle, Datenaustauschformate und Tool(ketten) bzw. die IT-Architektur generell zu erwarten?) wird durch Kapitel 6.4, 7.2, und 7.3 beantwortet. Die technischen Anforderungen zur Umsetzung durchgängigen digitalen Engineerings können wie folgt zusammengefasst werden:

- Verfügbarkeit von standardisierten Schnittstellen zwischen den Tools mit der Möglichkeit zur Nutzung neutraler Datenaustauschformate und Unterstützung einer gemeinsamen Referenzarchitektur
- Verfügbarkeit von Baukasten-Bibliotheken für jede Planungsdisziplin
- Etablierung eines "common data managements" als single source of truth für alle im Prozess entstehenden Metadaten (Datendrehscheibe)
- Verfügbarkeit einer Plattform für kollaboratives Arbeiten (inkl. 3D Visualisierung)

- Ausschließliche Verwendung von Tools, die die Objektorientierung unterstützen
- Möglichkeit der automatischen Modellgenerierung für sämtliche Simulationen im Anlagenentstehungsprozess bis hin zur virtuellen Inbetriebnahme

Für **RQ3** (Dimension Organisation – Welche Auswirkungen sind für Organisationformen in den Unternehmen zu erwarten?) kann festgehalten werden, dass sich sowohl in der Praxis als auch in der Wissenschaft deutlich herauskristallisiert, dass kulturelle, organisatorische sowie politische Faktoren das Potenzial besitzen, Transformationen in Unternehmen oder Bereichen zu verhindern. Aus diesem Grund ist es besonders wichtig, dass folgende Anforderungen im zu transformierenden Bereich umgesetzt werden:

- Klare Verantwortlichkeiten entlang des Anlagenentstehungsprozesses (Daten-, Prozess-, Ergebnisverantwortung)
- Schärfung des Bewusstseins über die Notwendigkeit von Datendurchgängigkeit und Objektorientierung im Planungsprozess (von Management über Planende bis hin zur Instandhaltung)
- Verfügbarkeit von Schulungen und Qualifizierungsmaßnahmen zur Sicherstellung von ausreichendem Know-How der Mitarbeitenden entsprechend definierten Rollen
- Transparenz über neue Rollen, die für einen optimalen Prozess aufgebaut werden müssen

Die Antwort auf **RQ4** (Wie sieht eine ganzheitliche Transformationsstrategie in Richtung durchgängigem digitalen Engineering aus?) kann Abbildung 60 sowie Kapitel 8.1 entnommen werden.

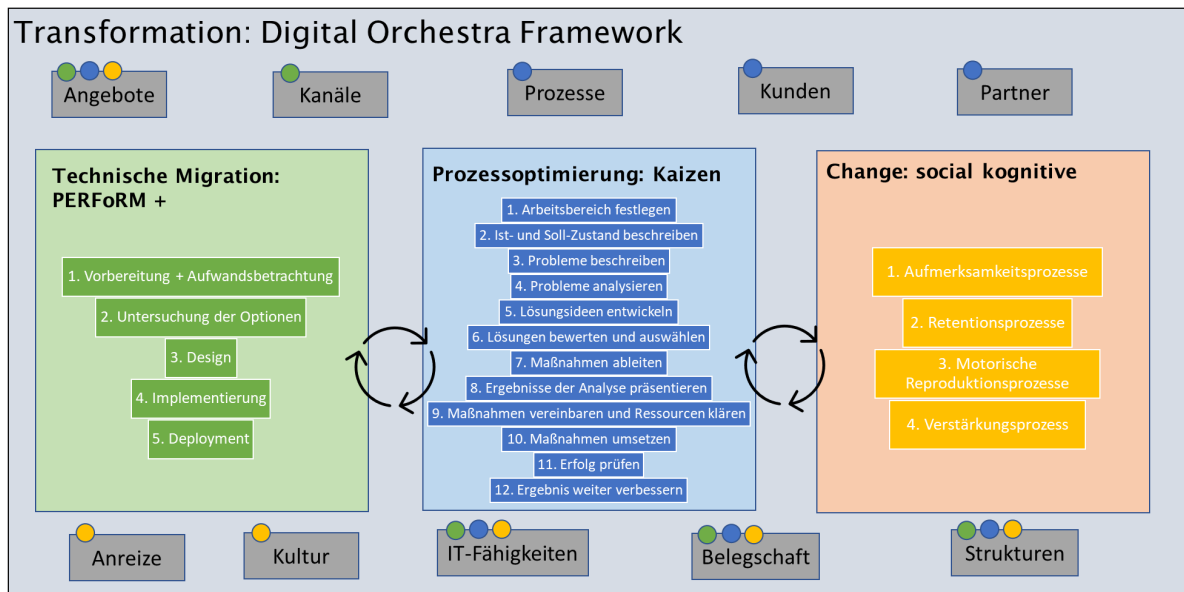


Abbildung 60: ganzheitliche Transformationsstrategie

Anhand der in Kapitel 2.3.4 definierten Kriterien kann **RQ5** (Anhand welcher Kriterien kann diese Transformationsstrategie ausgewählt und bewertet werden?) beantwortet werden. Die Kriterien, die eine ganzheitliche Transformationsstrategie erfüllen muss, lauten:

- (A1): Berücksichtigung Aufwand/Kosten
- (A2) Beschreibung der Vorgehensweise
- (A3) Eignung für ganzheitliche Betrachtung
- (A4) Berücksichtigung von Daten, Tools und IT-Infrastruktur
- (A5) Menschen im Fokus
- (A6) Berücksichtigung von externen und internen Umweltbedingungen
- (A7) Beachtung bestehender Prozesse

Für die Beantwortung von **RQ6** (Können die zu erwartenden Auswirkungen durch eine geeignete ganzheitliche Transformationsstrategie positiv beeinflusst werden?) wird das in Kapitel 4.5.1 beschriebene Zustandsmodell nach VDI-Richtlinie 3695 [10] herangezogen und der nach Anwendung der ganzheitlichen Transformationsstrategie resultierende Engineeringprozess bewertet (vgl. Kapitel 9.4). Die Ergebnisse belegen eindeutig, dass die betrachteten Aspekte sich jeweils um mindestens ein

Qualitätslevel erhöht haben und teilweise sogar das höchste mögliche Qualitätslevel erreicht wird.

Nichtsdestotrotz muss die vorgeschlagene Transformationsstrategie auch kritisch betrachtet werden. So spielen kulturelle Einflüsse (in der Organisation) eine große Rolle für die erfolgreiche Durchführung der ganzheitlichen Transformationsstrategie. Dazu gehört, dass der dreidimensionale Ansatz zwar theoretisch die gesamte Abdeckung aller betrachteten Aspekte sowie deren Verzahnung ermöglicht, in der Realität liegen die Verantwortungen für die jeweiligen Aspekte aber oft in unterschiedlichen Silos mit unterschiedlichen Prioritäten. Dieser Faktor erschwert eine konsistente Betrachtung über die gesamte Organisation hinweg. Auch die Erkenntnis von Kotter [130] ist für die vorliegende Arbeit zutreffend. Demnach kann ein umfangreiches Change-Projekt nur dann erfolgreich sein, wenn ein ausreichend großes Team aus verschiedenen Abteilungen und Ebenen dieses vorantreibt und leitet. Er betont die Wichtigkeit der Einbeziehung von möglichst hohen Führungsebenen und die breite Streuung von Wissen und Fähigkeiten in diesem Führungsteam. In großen Unternehmen soll dieses Team aus 20 bis 50 Personen bestehen.

So kann festgehalten werden, dass die ganzheitliche Transformation kein Projekt ist, das in wenigen Monaten oder einem Jahr durchgeführt werden kann. Vielmehr ist es ein kontinuierlicher Prozess, der sich auch über mehrere Jahre erstrecken kann, was in der Praxis dazu führen kann, dass an der Wirksamkeit der Transformation gezweifelt wird aufgrund fehlender kurzfristiger Erfolge. Daher ist es unerlässlich, dass eine starke Führungskraft auf möglichst hoher Ebene hinter dem Vorhaben steht und die nötigen Ressourcen bereitstellt. Sollte dies nicht der Fall sein, kann der Erfolg der Transformation stark gefährdet sein.

Zudem ergeben sich durch Erkenntnisse aus der vorliegenden Arbeit weitere offene Punkte, die außerhalb des Betrachtungsraumes liegen, aber dennoch in zukünftiger Forschung beachtet werden sollten. Dazu zählen folgende Aspekte:

- Möglichkeit zur Nutzung von Betriebsdaten zur Planung von Neu-Anlagen inkl. möglicher Einfluss auf den Engineeringprozess.

- Möglichkeit zur Nutzung von Erfahrung und Wissen aus vergangenen Projekten inkl. möglicher Einfluss auf den Engineeringprozess.
- Detaillierte Untersuchung standardisierter Datenmodelle im Anlagenentstehungsprozess über die gesamte Branche nötig (erfolgt aktuell im Projekt DIAMOND [73]).
- Durchgängiges digitales Engineering bietet viele Potenziale für die Steigerung von Nachhaltigkeit von Produktionssystemen. Diese These bildet die Grundlage für ein großes Forschungsfeld.
- Automatische Generierung von digitalen Zwillingen durch durchgängiges digitales Engineering.

## 11 References

- [1] B. Vogel–Heuser, T. Bauernhansl, and M. ten Hompel, Eds., *Handbuch Industrie 4.0*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [2] F. Pires, A. Cachada, J. Barbosa, A. P. Moreira, and P. Leitao, “Digital Twin in Industry 4.0: Technologies, Applications and Challenges,” in *2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Helsinki, Finland, 2019, pp. 721–726.
- [3] S. Adler and S. Masik, “Der digitale Zwilling für virtuelle Fabrikplanung und – betrieb,” in *Virtual Reality und Augmented Reality in der Digitalen Produktion*, H. Orsolits and M. Lackner, Eds., 2020, pp. 191–216.
- [4] F. Biesinger, B. Kras, and M. Weyrich, “A Survey on the Necessity for a Digital Twin of Production in the Automotive Industry,” in *A Survey on the Necessity for a Digital Twin of Production in the Automotive Industry*, SALERNO, Italy, 2019, pp. 1–8.
- [5] A. Meißner, R. Glass, C. Gebauer, S. Stürmer, and J. Metternich, “Hindernisse der Industrie 4.0 – Umdenken notwendig?,” *ZWF*, vol. 112, pp. 607–611, 2017, doi: 10.3139/104.111787.
- [6] I. Vuksanović Herceg, V. Kuč, V. M. Mijušković, and T. Herceg, “Challenges and Driving Forces for Industry 4.0 Implementation,” *Sustainability*, vol. 12, no. 10, p. 4208, 2020, doi: 10.3390/su12104208.
- [7] D. Kiel, J. M. MÜLLER, C. ARNOLD, and K.–I. Voigt, “SUSTAINABLE INDUSTRIAL VALUE CREATION: BENEFITS AND CHALLENGES OF INDUSTRY 4.0,” *Int. J. Innov. Mgt.*, vol. 21, no. 08, p. 1740015, 2017, doi: 10.1142/S1363919617400151.
- [8] A. Calá, F. Boschi, P. Fantini, and M. Taisch, “Migration Strategies towards the Digital Manufacturing Automation,” in *The digital shopfloor: industrial automation in the Industry 4.0 era – Performance Analysis and Applications*.

- [9] VDI / VDE, Ed., "Statusreport Durchgängiges Engineering in Industrie 4.0 Wertschöpfungsketten," Düsseldorf, Jan. 2016.
- [10] *VDI-Richtlinie 3695: Blatt 1 / Part 1*, Verein Deutscher Ingenieure (VDI e.V.), Nov. 2020.
- [11] inray Industriesoftware GmbH, *Der Weg von Industrie 1.0 zu Industrie 4.0*. [Online]. Available: <https://www.inray.de/aktuelles/der-weg-von-industrie-1-0-nach-industrie-4-0> (accessed: Dec. 21 2021).
- [12] acatech + Forschungsunion, AK Industrie 4.0, "Umsetzungsempfehlung für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0: Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. acatech + Forschungsunion," Berlin, 2013.
- [13] D. Wegener, "Industry 4.0 – the Future of Manufacturing," in *PwC Global Conference*.
- [14] G. Schuh, "Industrie 4.0 – Steigerung der Kollaborationsproduktivität," *Fachkongress Industrie 4.0: Von der Strategie zur Praxis*, 2013.
- [15] W. Bauer, S. Schlund, D. Marrenbach, and O. Ganschar, "Industrie 4.0: Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland," Studie, 2014.
- [16] W. Behrendt, G. Güntner, and S. Reich, *Industrie 4.0: Perspektiven für die Salzburger Wirtschaft*.
- [17] R. Obermaier, Ed., *Handbuch Industrie 4.0 und Digitale Transformation*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019.
- [18] J. Schlick, P. Stephan, M. Loskyll, and D. Lappe, "Industrie 4.0 in der praktischen Anwendung," in *Handbuch Industrie 4.0 Bd. 2: Automatisierung*, B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, M. ten Hompel, T. Bauernhansl, and M. ten Hompel, Eds., 2nd ed.: Springer Reference Technik, 2017, pp. 3–30.

- [19] Industrial Internet Consortium, *A Global Industry First: Industrial Internet Consortium and Plattform Industrie 4.0*. [Online]. Available: <https://www.iiconsortium.org/press-room/04-20-17.htm> (accessed: Apr. 19 2022).
- [20] H. Kagermann, "Chancen von Industrie 4.0 nutzen," in *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*.
- [21] M. Hermann, T. Pentek, and B. Otto, "Design principles for industrie 4.0 scenarios," in *2016 49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS)*, 2016, pp. 3928–3937.
- [22] Plattform Industrie 4.0, "Forschungsagenda Industrie 4.0 – Aktualisierung des Forschungsbedarfs,"
- [23] A. Gilchrist, *Industry 4.0*. Berkeley, CA: Apress, 2016.
- [24] A. Calà, "A novel migration approach towards decentralized automation in cyber-physical production systems," 2019.
- [25] M. Ghobakhloo, "The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0," *JMTM*, vol. 29, no. 6, pp. 910–936, 2018, doi: 10.1108/JMTM-02-2018-0057.
- [26] M. Rüßmann *et al.*, "Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries," 2015.
- [27] IDG Business Media GmbH, "Studie Industrie 4.0," 2017.
- [28] J. M. Müller, D. Kiel, and K.-I. Voigt, "What Drives the Implementation of Industry 4.0? The Role of Opportunities and Challenges in the Context of Sustainability," *Sustainability*, vol. 10, no. 1, p. 247, 2018, doi: 10.3390/su10010247.
- [29] S. Weyer, M. Schmitt, M. Ohmer, and D. Gorecky, "Towards Industry 4.0 – Standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor



production systems,” *IFAC–PapersOnLine*, vol. 48, no. 3, pp. 579–584, 2015, doi: 10.1016/j.ifacol.2015.06.143.

- [30] Forschungsunion and acatech, “Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group,” *Securing the future of German manufacturing industry*, Apr. 2013.
- [31] Standardization Council Industrie 4.0, “Deutsche Normungsroadmap Industrie 4.0 –: Version 4,” Mar. 2020.
- [32] A. Botthof and E. A. Hartmann, *Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [33] J. Deuse, K. Weisner, A. Hengstebeck, and F. Busch, “Gestaltung von Produktionssystemen im Kontext von Industrie 4.0,” in *Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0*: Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2015, pp. 99–109.
- [34] G. Schuh, T. Potente, R. Christina, and A. Hauptvogel, “Steigerung der Kollaborationsproduktivität durch cyber–physische Systeme,” in *Handbuch Industrie 4.0 Bd. 2: Automatisierung*, B. Vogel–Heuser, T. Bauernhansl, M. ten Hompel, T. Bauernhansl, and M. ten Hompel, Eds., 2nd ed.: Springer Reference Technik, 2017, pp. 75–92.
- [35] T. Erol, A. F. Mendi, and D. Dogan, “Digital Transformation Revolution with Digital Twin Technology,” in *2020 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, Istanbul, Turkey, 10222020, pp. 1–7.
- [36] M. Shafto and et al., “NASA Modeling, Simulation, Information Technology & Processing – TA11,” *National Aeronautics and Space Administration*, 2010.
- [37] Z. Bradac, P. Marcon, F. Zezulka, J. Arm, and T. Benesl, “Digital Twin and AAS in the Industry 4.0 Framework,” *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 618, p. 12001, 2019, doi: 10.1088/1757–899X/618/1/012001.

- [38] E. Glaessgen and D. Stargel, "The Digital Twin Paradigm for Future NASA and US Air Force Vehicles," *53rd AIAA/ASME/ASCE/ AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, 1818 ff., Special Session on the Digital Twin 2012.
- [39] M. Grieves, "Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication: White Paper 1," Washington, DC, USA, 2014.
- [40] Y. Seongjin, P. Jun-Hong, and K. Won-Tae, "Data-centric Middleware based Digital Twin Platform for Dependable Cyber-Physical Systems: July 4 (Tue.)–July 7 (Fri.), 2017, Milan, Italy : the Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks," 2017. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=7985824>
- [41] R. Rosen, G. von Wichert, G. Lo, and K. D. Bettenhausen, "About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 3, pp. 567–572, 2015, doi: 10.1016/j.ifacol.2015.06.141.
- [42] B. Ashtari Talkhestani, N. Jazdi, W. Schögl, and M. Weyrich, "A concept in synchronization of virtual production system with real factory based on anchor-point method," *procedia CIRP*, vol. 67, pp. 13–17, 2017.
- [43] J. Ovtcharova and M. Grethler, "Industrial IoT – Digital Twin: Beyond the digital twin – making analytics come alive," Karlsruhe, 2018.
- [44] Y. Chen, "Integrated and intelligent manufacturing: Perspectives and enablers," *Engineering*, vol. 3, no. 5, pp. 588–595, 2017.
- [45] Z. Liu, N. Meyendorf, and N. Mrad, "The role of data fusion in predictive maintenance using digital twin," *Proc. Annu. Rev. Prog. Quant. Nondestruct. Eval.*, 2018.
- [46] R. Vrabič, J. A. Erkoyuncu, P. Butala, and R. Roy, "Digital twins: Understanding the added value of integrated models for through-life engineering services,"

*Procedia Manufacturing*, vol. 16, pp. 139–146, 2018, doi:  
10.1016/j.promfg.2018.10.167.

- [47] Y. Zheng, S. Yang, and H. Cheng, “An application framework of digital twin and its case study,” *J. Ambient Intell. Humanized Comput.*, vol. 10, no. 3, pp. 1141–1153, 2018.
- [48] B. Schleich, N. Anwer, L. Mathieu, and S. Wartzack, “Shaping the digital twin for design and production engineering,” *CIRP Annals*, vol. 66, no. 1, pp. 141–144, 2017, doi: 10.1016/j.cirp.2017.04.040.
- [49] F. Tao, J. Cheng, Q. Qi, M. Zhang, H. Zhang, and F. Sui, “Digital twin–driven product design, manufacturing and service with big data,” *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 94, 9–12, pp. 3563–3576, 2018, doi: 10.1007/s00170-017-0233-1.
- [50] G. Barbieri *et al.*, “A virtual commissioning based methodology to integrate digital twins into manufacturing systems,” *Prod. Eng. Res. Devel.*, vol. 15, 3–4, pp. 397–412, 2021, doi: 10.1007/s11740-021-01037-3.
- [51] A. Fuller, Z. Fan, C. Day, and C. Barlow, “Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 108952–108971, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2998358.
- [52] F. Pires, A. Cachada, J. Barbosa, A. Moreira, and P. Leitão, “Digital Twin in Industry 4.0: Technologies, Applications and Challenges,” *2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, pp. 721–726, 2019.
- [53] A. Parrott and L. Warshaw, “Industry 4.0 and the digital twin: Manufacturing meets its match,” 2017.
- [54] W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, and W. Sihn, “Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, pp. 1016–1022, 2018, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.

- [55] T. H.-J. Uhlemann, C. Lehmann, and R. Steinhilper, "The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0," *The 24th CIRP Conference on Life Cycle Engineering*, vol. 2017, no. 61, pp. 335-340, 2017.
- [56] M. Grieves and J. Vickers, "Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems," in *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, and A. Alves, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 85-113.
- [57] A. Madni, C. Madni, and S. Lucero, "Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering," *Systems*, vol. 7, no. 1, p. 7, 2019, doi: 10.3390/systems7010007.
- [58] Stefan Biffel, Richard Mordinyi, Heinrich Steininger und Dietmar Winkler, "Integrationsplattform für anlagenmodellorientiertes Engineering: Bedarfe und Lösungsansätze," in *Handbuch Industrie 4.0 Bd. 2: Automatisierung*, B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, M. ten Hompel, T. Bauernhansl, and M. ten Hompel, Eds., 2nd ed.: Springer Reference Technik, 2017, pp. 189-212.
- [59] M. Eigner, A. Detzner, P. Schmidt, and R. Tharma, "Definition des Digital Twin im Produktlebenszyklus,"
- [60] F. Biesinger, D. Meike, B. Kraß, and M. Weyrich, "A digital twin for production planning based on cyber-physical systems: A Case Study for a Cyber-Physical System-Based Creation of a Digital Twin," *procedia CIRP*, vol. 79, pp. 355-360, 2019, doi: 10.1016/j.procir.2019.02.087.
- [61] D. Wegener, "Industrie 4.0 - wie die Digitalisierung die Produktionskette revolutioniert," in *Handbuch Industrie 4.0 und Digitale Transformation*, R. Obermaier, Ed., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019, pp. 73-90.
- [62] ZVEI, "Führungskreis," 2017.
- [63] Plattform Industrie 4.0, "RAMI 4.0: Ein Orientierungsrahmen für die Digitalisierung," 2018.

- [64] ZVEI, “Das digitale Typenschild: Konsistent, nachhaltig, zukunftssicher, vernetzt,” Frankfurt, Oct. 2020.
- [65] AutomationML e.V., *AutomationML: What is AutomationML?* [Online]. Available: <https://www.automationml.org/about-automationml/automationml/> (accessed: Jan. 14 2021).
- [66] A. Mazak, M. Wimmer, C. Huemer, G. Kappel, and W. Kastner, “Rahmenwerk zur modellbasierten horizontalen und vertikalen Integration von Standards für Industrie 4.0,” in *Handbuch Industrie 4.0 Bd. 2: Automatisierung*, B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, M. ten Hompel, T. Bauernhansl, and M. ten Hompel, Eds., 2nd ed.: Springer Reference Technik, 2017, pp. 433–454.
- [67] R. Draht, *Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [68] DIN e.V. and DKE VDE, “Deutsche Normungsroadmap Industrie 4.0 – Version 4,” 2020.
- [69] V. SINGH and K. WILLCOX, “Engineering Design with Digital Thread,” in *Structural Health Monitoring 2017*, 2017.
- [70] M. Eckhart and A. Ekelhart, “Digital Twins for Cyber-Physical Systems Security: State of the Art and Outlook,” in *Security and Quality in Cyber-Physical Systems Engineering*, S. Biffel and et al., Eds.: Springer Nature Switzerland AG, 2019, pp. 383–412.
- [71] T. Margaria and A. Schieweck, “The digital thread in industry 4.0,” in *Integrated Formal Methods: 15th International Conference, IFM 2019, Bergen, Norway, December 2-6, 2019, Proceedings 15*, 2019, pp. 3–24.
- [72] S. Biffel, R. Mordinyi, H. Steininger, and D. Winkler, “Integrationsplattform für anlagenmodellorientiertes Engineering: Bedarfe und Lösungsansätze,” in *Handbuch Industrie 4.0 Bd. 2: Automatisierung*, B. Vogel-Heuser, T.

Bauernhansel, M. ten Hompel, T. Bauernhansl, and M. ten Hompel, Eds., 2nd ed.: Springer Reference Technik, 2017, pp. 189–212.

[73] DIAMOND, *Key Facts*. [Online]. Available: <https://diamond-project.de/#keyFacts> (accessed: May 23 2023).

[74] S. Karch *et al.*, “Lean Engineering – Identifying muda in engineering chains,” *CIRP CMS*, vol. 56, 2023.

[75] R. Mehr and A. Lüder, “Managing Complexity Within the Engineering of Product and Production Systems,” in *Security and Quality in Cyber-Physical Systems Engineering*, S. Biffl and *et al.*, Eds.: Springer Nature Switzerland AG, 2019, pp. 57–79.

[76] H. Kagermann, “Chancen von Industrie 4.0 nutzen,” *Handbuch Industrie 4.0 Bd. 4: Allgemeine Grundlagen*, pp. 237–248, 2017.

[77] J. Deuse, M. Eigner, O. Erohin, M. Krebs, J. Schallow, and P. D. Schäfer, “Intelligente Nutzung von implizitem Planungswissen der Digitalen Fabrik,” *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, vol. 106, no. 6, pp. 433–437, 2011, doi: 10.3139/104.110578.

[78] N. Verina and J. Titko, “Digital transformation: conceptual framework,” in *Proceedings of 6th International Scientific Conference Contemporary Issues in Business, Management and Economics Engineering '2019*, Vilnius Gediminas Technical University, 2019.

[79] A. Khan and K. Turowski, “A Survey of Current Challenges in Manufacturing Industry and Preparation for Industry 4.0,” in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 450, *Proceedings of the First International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'16): Volume 1*, A. Abraham, S. Kovalev, V. Snášel, and V. Tarassov, Eds., 1st ed., Cham: Springer International Publishing; Imprint: Springer, 2016, pp. 15–26.

- [80] M. Lorenz, "Handling of strategic uncertainties in integrated product development," *München: TU, Diss*, 2008.
- [81] A. Kritsonis, "Comparison of Change Theories," *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCHOLARLY ACADEMIC INTELLECTUAL DIVERSITY*, vol. 8, no. 1, 2004–2005.
- [82] J. S. Brown and E. O. Teisberg, "Options thinking for leading innovation," *University of Virginia, Darden School of Business*, 2003.
- [83] K. Ehrlenspiel and H. Meerkamm, *Integrierte produktentwicklung: Denkabläufe, methodeneinsatz, zusammenarbeit*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2013.
- [84] J. Highsmith, *Agile project management: creating innovative products*: Pearson education, 2009.
- [85] S. Nerur, R. Mahapatra, and G. Mangalaraj, "Challenges of migrating to agile methodologies," *Communications of the ACM*, vol. 48, no. 5, pp. 72–78, 2005.
- [86] Ashley May Calder, "Organizational Change: Models for Successfully Implementing Change,"
- [87] A. Cala, A. Luder, J. Vollmar, and M. Foehr, "Evaluation of migration scenarios towards cyber–physical production systems using SysML," in *2017 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE)*, 2017.
- [88] M. Hofmann, *Prozessoptimierung als ganzheitlicher Ansatz*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020.
- [89] S. Koch, *Einführung in das Management von Geschäftsprozessen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [90] A. D. J. Chandler, *Strategy and Structure: Chapters in the History of the American Industrial Enterprise*. Cambridge: MIT Press, 1962.
- [91] M. Torchiano, M. Di Penta, F. Ricca, A. de Lucia, and F. Lanubile, "Migration of information systems in the Italian industry: A state of the practice survey,"

*Information and Software Technology*, vol. 53, no. 1, pp. 71–86, 2011, doi: 10.1016/j.infsof.2010.08.002.

- [92] A. Cachada, F. Pires, J. Barbosa, P. Leitão, and (Keine Angabe), “Petri nets Approach for Designing the Migration Process Towards Industrial Cyber–Physical Production Systems,” *1st IEEE Industrial Cyber–Physical Systems Conference (ICPS)*, 2018.
- [93] S. Cetin, N. I. Altintas, H. Oguztuzun, A. H. Dogru, O. Tufekci, and S. Suloglu, “A Mashup–Based Strategy for Migration to Service–Oriented Computing,” *IEEE International Conference on Pervasive. IEEE*, pp. 169–172, 2007, doi: 10.1109/PERSER.2007.4283910.
- [94] A. Cala, F. Boschi, P. M. Fantini, A. Lüder, M. Taisch, and J. Elger, “Migration Strategies towards the Digital Manufacturing Automation,” 2019.
- [95] C. Zillmann *et al.*, “The SOAMIG Process Model in Industrial Applications,” *2011 15th European Conference on Software Maintenance and Reengineering. IEEE*, pp. 339–342, 2011, doi: 10.1109/CSMR.2011.48.
- [96] S. Balasubramaniam, G. Lewis, E. Morris, S. Simanta, and D. Smith, “SMART: Application of a Method for Migration of Legacy Systems to SOA Environments,” *International Conference on Service–Oriented Computing*, pp. 678–690, 2008.
- [97] P. Beserra, A. Camara, R. Ximenes, A. Albuquerque, and N. Mendonça, “Cloudstep: A Step–by–Step Decision Process to Support Legacy Application Migration to the Cloud,” *2012 IEEE 6th International Workshop on the Maintenance and Evolution of Service–Oriented and Cloud–Based*, pp. 7–16, 2012.
- [98] Rashmi, S. Mehruz, and G. Sahoo, “A five–phased approach for the cloud migration,” *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 2, no. 4, pp. 286–291, 2012.



- [99] A. W. Colombo *et al.*, *Industrial Cloud-Based Cyber-Physical Systems*. Cham: Springer International Publishing, 2014.
- [100] J. Delsing, F. Roseqvist, O. Carlsson, A. Colombo, and T. Bangemann, "Migration of Industrial Process Control Systems into Service Oriented Architecture: 38th annual conference on IEEE Industrial Electronics Society ; 25 – 28 Oct. 2012, École de Technologie Supérieure de Montréal, Université du Québec, Montreal, Canada ; proceedings," pp. 5790–5796, 2012. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=6373889>
- [101] R. Fuentes–Fernández, J. Pavón, and F. Garijo, "A model–driven process for the modernization of component–based systems," *Science of Computer Programming*, vol. 77, no. 3, pp. 247–269, 2012, doi: 10.1016/j.scico.2011.04.003.
- [102] A. Cala *et al.*, "Migration from traditional towards cyber–physical production systems," in *2017 IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Emden, 72017, pp. 1147–1152.
- [103] A. Cala, A. Luder, F. Boschi, G. Tavola, and M. Taisch, "Migration towards digital manufacturing automation — An assessment approach," in *2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, St. Petersburg, 52018, pp. 714–719.
- [104] R. Rocca, F. Boschi, A. Cala, P. Fantini, and M. Taisch, "A migration methodology for factories digital transformation," *Proceedings of the 6th European Lean Educator Conference*, pp. 311–319, 2019.
- [105] M. Brodie and M. Stonebraker, "DARWIN: On the Incremental Migration of Legacy Information Systems," vol. 1993.
- [106] B. Wu *et al.*, "The Butterfly Methodology: a gateway–free approach for migrating legacy information systems," in *Proceedings. Third IEEE International Conference on Engineering of Complex Computer Systems (Cat. No.97TB100168)*, Como, Italy, 1997, pp. 200–205.

- [107] L. Wochnik, "Das Kontinuierliche Verbesserungsprogramm (KVP) als Instrument der Gestaltung des organisatorischen Wandels," in *Die ökonomische Modernisierung der Bundeswehr*, pp. 191–210.
- [108] M. Imai, *Kaizen: The Key to Japan's Competitive Success*. New York, NY, USA: McGraw–Hill Education, 1986.
- [109] T. Ohno, W. Hof, E. C. Stotko, and M. Rother, "Das Toyota–Produktionssystem. Das Standardwerk zur Lean Production. 3. erw. und aktualisierte Aufl," *Campus–Verlag (Produktion), Frankfurt am Main*, 2013.
- [110] M. Gahleitner, *7 Arten der Verschwendung (Muda) im Büro*. [Online]. Available: <https://mgahleitner.wordpress.com/2015/07/16/7-arten-der-verschwendung-muda-im-buero/> (accessed: Jul. 6 2023).
- [111] J. Fleig, *Kaizen: Methoden und Werkzeuge für Kaizen*. [Online]. Available: <https://www.business-wissen.de/hb/methoden-und-werkzeuge-fuer-kaizen/> (accessed: May 1 2023).
- [112] P. B. Crosby, *Cutting the cost of quality; the defect prevention workbook for managers*. Boston, 1967.
- [113] K. Magnusson, D. Kroslid, and B. Bergman, *Six Sigma umsetzen: Die neue Qualitätsstrategie für Unternehmen*, 2nd ed. München: Hanser, 2003. [Online]. Available: <http://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446225022>
- [114] H. Toutenburg and P. Knöfel, *Six Sigma: Methoden und Statistik für die Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [115] T. Pyzdek and P. Keller, *Six Sigma Handbook*, 5th ed. New York: McGraw–Hill Education, 2018. [Online]. Available: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781260121827>
- [116] M. Hammer and J. Champy, *Business reengineering: die Radikalkur für das Unternehmen*. Campus–Verlag, 1995.

- [117] R. C. Martin, *Agile software development: Principles, patterns, and practices*. Upper Saddle River N.J.: Prentice Hall, 2003.
- [118] M. Kaisti *et al.*, "Agile methods for embedded systems development – a literature review and a mapping study," *J Embedded Systems*, vol. 2013, no. 1, 2013, doi: 10.1186/1687-3963-2013-15.
- [119] S. J. Chang, A. Messina, and P. Modigliani, "How Agile Development Can Transform Defense IT Acquisition," in *Advances in Intelligent Systems and Computing, Proceedings of 4th International Conference in Software Engineering for Defence Applications*, P. Ciancarini, A. Sillitti, G. Succi, and A. Messina, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 13–26.
- [120] K. e. a. Beck, "The Agile Manifesto," 2001.
- [121] R. D. Stacey, *Strategic management and organisational dynamics: The challenge of complexity to ways of thinking about organisations*. Pearson education, 2007.
- [122] M. L. U. Lindemann, "UNCERTAINTY HANDLING IN INTEGRATED PRODUCT DEVELOPMENT," *INTERNATIONAL DESIGN CONFERENCE – DESIGN*, pp. 175–182, 2008.
- [123] M. Rother, *Toyota Kata: Managing people for improvement, adaptiveness and superior results*. New York, NY, USA: MGH, 2019.
- [124] R. Moen and C. Norman, "Evolution of the PDCA Cycle," 2006.
- [125] K. Lewin, "Frontiers in group dynamics: Concept, method and reality in social science; social equilibria and social change," *Human Relations*, vol. 1, pp. 5–41, 1947.
- [126] T. Newcomb and E. Hartley, *No Title Group decision and social change*: Holt. New York.

- [127] S. A. Z. Kazmi and M. Naarananoja, "Collection of change management models—an opportunity to make the best choice from the various organizational transformational techniques," *GSTF Business Review (GBR)*, vol. 2, no. 4, p. 44, 2013.
- [128] S. P. Robbins and T. Judge, *Organizational behavior*, 15th ed. Boston: Pearson, 2013.
- [129] J. Hiatt, *ADKAR: a model for change in business, government, and our community*. Prosci, 2006.
- [130] J. P. Kotter, "Leading change: Why transformation efforts fail," *Harvard Bus. Rev.*, pp. 59–67, 1995, doi: 10.1016/0024-6301(95)91633-4.
- [131] Lippitt, R., Watson, J., and Westley, B., "Dynamics of Planned Change," *New York: Harcourt Brace.*, 1958.
- [132] M. Golden Pryor, S. Taneja, J. Humphreys, D. Anderson, and L. Singleton, "CHALLENGES FACING CHANGE MANAGEMENT CHALLENGES FACING CHANGE MANAGEMENT CHALLENGES FACING CHANGE MANAGEMENT CHALLENGES FACING CHANGE MANAGEMENT CHALLENGES FACING CHANGE MANAGEMENT THEORIES AND RESEARCH THEORIES AND RESEARCH THEORIES AND RESEARCH THEORIES AND RESEARCH THEORIES AND RESEARCH," *Delhi Business Review*, vol. 9, no. 1, pp. 1–20, 2008.
- [133] J. O. Prochaska and C. C. DiClemente, "Transtheoretical therapy: Toward a more integrative model of change," *Psychotherapy: Theory Research and Practice*, vol. 20, pp. 161–173, 1982.
- [134] A. Freeman and M. Dolan, "Revisiting prochaska and DiClemente's stages of change theory: An expansion and specification to aid in treatment planning and outcome evaluation," *Cognitive and Behavioral Practice*, vol. 8, no. 3, pp. 224–234, 2001, doi: 10.1016/S1077-7229(01)80057-2.

- [135] A. Bandura, *Social foundations of thought and action : a social cognitive theory*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice–Hall., 1986.
- [136] SAP, *Was ist digitale Transformation?* [Online]. Available: <https://www.sap.com/austria/insights/what-is-digital-transformation.html> (accessed: Jul. 9 2022).
- [137] T. Hess, *Digitale Transformation strategisch steuern: Vom Zufallstreffer zum systematischen Vorgehen*. Wiesbaden: Springer, 2019. [Online]. Available: <http://www.springer.com/>
- [138] S. Kavadias, K. Ladas, and C. Loch, “The transformative Business Model: How to tell if you have one,” *Harward Bus. Rev.*, Oktober, pp. 91–98, 2016.
- [139] F. Nwaiwu, “Review and Comparison of Conceptual Frameworks on Digital Business Transformation,” *JOC*, vol. 10, no. 3, pp. 86–100, 2018, doi: 10.7441/joc.2018.03.06.
- [140] Viduni Udovita, “Conceptual Review on Dimensions of Digital Transformation in Modern Era,” *IJSRP*, vol. 10, no. 2, p9873, 2020, doi: 10.29322/IJSRP.10.02.2020.p9873.
- [141] D. Marchand and M. Wade, “DIGITAL BUSINESS TRANSFORMATION: WHERE IS YOUR COMPANY ON THE JOURNEY,” *IMD*, no. 187, 2014.
- [142] S. Berman, P. Korsten, and A. Marshall, “Digital reinvention in action,” 2016.
- [143] D. Nylén and J. Holmström, “Digital innovation strategy: A framework for diagnosing and improving digital product and service innovation,” *Business Horizons*, vol. 58, no. 1, pp. 57–67, 2015, doi: 10.1016/j.bushor.2014.09.001.
- [144] C. Matt, T. Hess, and A. Benlian, “Digital Transformation Strategies,” *Bus Inf Syst Eng*, vol. 57, no. 5, pp. 339–343, 2015, doi: 10.1007/s12599-015-0401-5.

- [145] Q. Corver and G. Elkhuizen, "A Framework for Digital Business Transformation," Cognizant, 2014. [Online]. Available: .Retrieved from <https://www.cognizant.com/InsightsWhitepapers/aframework-for-digital-business-transformation-codex-1048.pdf>
- [146] M. Wade, A. Noronha, J. Macaulay, and J. Barbier, "ORCHESTRATING DIGITAL BUSINESS TRANSFORMATION: Working in Concert to Achieve Digital Excellence," 2017.
- [147] D. Bowersox, D. Closs, and R. Drayer, "The Digital Transformation: Technology and Beyond," *Supply Chain Management Review*, vol. 9, 2005.
- [148] A. Cachada, F. Pires, J. Barbosa, P. Leitao, and A. Cala, "Petri nets methodology for the design and control of migration processes towards industry 4.0," in *2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems 5 2018*, pp. 540-545.
- [149] McKinsey&Company, "unlocking success in digital transformations: Digital transformations are even more difficult than traditional change efforts to pull off. But the results from the most effective transformations point to five factors for success.," 2018.
- [150] S. Kerber, *Prozessgestaltung zum Einsatz digitaler Fabrikgesamtmodelle*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.
- [151] G. Pawellek, *Ganzheitliche Fabrikplanung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [152] S. Biffli, A. Lüder, and D. Gerhard, Eds., *Multi-Disciplinary Engineering for Cyber-Physical Production Systems*. Cham: Springer International Publishing, 2017.
- [153] K. H. Weber, *Engineering verfahrenstechnischer Anlagen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016.

- [154] M. Eigner, D. Roubanov, and R. Zafirov, *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [155] P. Burggräf, S. Koch, M. E. Esfahani, S. P. Vierschilling, and V. Hahn, "Layoutplanung," in *Fabrikplanung*, P. Burggräf and G. Schuh, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021, pp. 409–454.
- [156] C. Grundig, *Fabrikplanung: Planungssystematik – Methoden – Anwendungen*, 7th ed. München, 2021.
- [157] W. Neundorf, H. Scheffczyk, and L. Vollmer, *Entwicklung einer wandlungsfähigen Fabrikstruktur*, 89th ed. Köln: VDI Verlag, 1999.
- [158] M. Müller–Seegers, F. Fisser, and P. Nyhuis, *Produktivität durch maßgeschneiderte Fabriken*, 96th ed. Köln: VDI Verlag, 2006.
- [159] M. Trautz, R. Herkrath, M. F. Brunk, M. Dannapfel, and S. Koch, "Gebäudeplanung und Technische Gebäudeausrüstung," in *Fabrikplanung*, P. Burggräf and G. Schuh, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021, pp. 455–496.
- [160] R. List, *CATIA V5 – Grundkurs für Maschinenbauer: Bauteil- und Baugruppenkonstruktion, Zeichnungsableitung*, 4th ed. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009.
- [161] Siemens AG Digital Industries, *Process Simulate für Teamcenter*. [Online]. Available: [https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/tecnomatix/15.1.2/PS\\_TC#uid:index\\_xid1015772](https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/tecnomatix/15.1.2/PS_TC#uid:index_xid1015772)
- [162] B. Gischel, *Handbuch EPLAN Electric P8*, 5th ed. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2015.
- [163] Siemens AG Digital Industries, *SIMATIC STEP 7 und WinCC Engineering V17: Systemhandbuch*.

- [164] COPADATA, *Was bedeutet HMI?* [Online]. Available: <https://www.copadata.com/de/produkt/zenon-software-platform-fuer-industrie-energieautomatisierung/visualisierung-steuerung/was-ist-ein-hmi/> (accessed: Oct. 31 2023).
- [165] E. K. InTec, "Guideline\_ViPer\_V1.21,"
- [166] Luisa Schmid, "RF::Suite (YAMS): Handbuch RF::YAMS," 2019.
- [167] Mewes & Partner GmbH, *WinMOD-Systemsoftware: Handbuch*.
- [168] A. Luder, M. Foehr, L. Hundt, M. Hoffmann, Y. Langer, and S. Frank, "Aggregation of engineering processes regarding the mechatronic approach," in *ETFA2011*, Toulouse, France, 092011, pp. 1–8.
- [169] T. Wagner, C. Hausner, J. Elger, U. Lowen, and A. Luder, "Engineering Processes for Decentralized Factory Automation Systems," in *Factory Automation*, J. Silvestre-Blanes, Ed.: InTech, 2010.
- [170] A. Lüder, L. H. M. Foehr, T. Wagner, J.-J. Zaddach, and T. Holm, "Manufacturing system engineering with mechatronical units," in *2010 IEEE 15th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2010)*, Bilbao, 092010, pp. 1–8.
- [171] *Digitale Fabrik: Grundlagen*, 4499, Verein Deutscher Ingenieure (VDI e.V.), 2008.
- [172] *VDI-Richtlinie 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*, Verein Deutscher Ingenieure (VDI e.V.), Düsseldorf, 2004.
- [173] A. Lüder, N. Schmidt, and R. Drath, "Standardized Information Exchange Within Production System Engineering," in *Multi-Disciplinary Engineering for Cyber-Physical Production Systems*, S. Biffli, A. Lüder, and D. Gerhard, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 235–257.



- [174] S. Feldmann *et al.*, “Towards Effective Management of Inconsistencies in Model-Based Engineering of Automated Production Systems,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 3, pp. 916–923, 2015, doi: 10.1016/j.ifacol.2015.06.200.
- [175] M. Sabou, O. Kovalenko, F. Ekaputra, and S. Biffli, “Beiträge des Semantic Web zum Engineering für Industrie 4.0,” in *Handbuch Industrie 4.0 Bd. 2: Automatisierung*, B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, M. ten Hompel, T. Bauernhansl, and M. ten Hompel, Eds., 2nd ed.: Springer Reference Technik, 2017, pp. 293–313.
- [176] N. Schmidt, A. Lüder, S. Biffli, and H. Steininger, “Analyzing Requirements on Software Tools According to the Functional Engineering Phase in the Technical Systems Engineering Process,” *Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA)*, pp. 1–8, 2014.
- [177] S. Biffli, R. Mordinyi, and T. Moser, “Integriertes Engineering mit Automation Service Bus,” *atp edition*, vol. 54, no. 12, p. 36, 2012, doi: 10.17560/atp.v54i12.362.
- [178] T. Tauchnitz, “Schnittstellen ermöglichen Datenintegration in der Prozessindustrie: Ansätze und Realisierung einer schnellen Standardisierung von Schnittstellen,” in *Handbuch Industrie 4.0 Bd. 2: Automatisierung*, B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, M. ten Hompel, T. Bauernhansl, and M. ten Hompel, Eds., 2nd ed.: Springer Reference Technik, 2017, pp. 335–348.
- [179] A. Fay *et al.*, “Durchgängigkeit in Wertschöpfungsketten von Industrie 4.0,” in *AUTOMATION 2016*: VDI Verlag, 2016, pp. 129–130.
- [180] T. Tauchnitz, “Integriertes Engineering – wann, wenn nicht jetzt!,” *atp*, vol. 55, 01–02, p. 46, 2013, doi: 10.17560/atp.v55i01–02.1930.
- [181] B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, M. ten Hompel, T. Bauernhansl, and M. ten Hompel, Eds., *Handbuch Industrie 4.0 Bd. 2: Automatisierung*, 2nd ed.: Springer Reference Technik, 2017.

- [182] D. Wegener, "Industrie 4.0 – Chancen und Herausforderungen für einen Global Player," in *Handbuch Industrie 4.0 Bd. 2: Automatisierung*, B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, M. ten Hompel, T. Bauernhansl, and M. ten Hompel, Eds., 2nd ed.: Springer Reference Technik, 2017, pp. 391–405.
- [183] A. Lüder, "Was ist eine Engineeringdatenlogistik?," Vorlesungsunterlagen, Maschinenbau, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg.
- [184] H. Lai and X. Deng, "INTEROPERABILITY ANALYSIS OF IFC-BASED DATA EXCHANGE BETWEEN HETEROGENEOUS BIM SOFTWARE," *JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND MANAGEMENT*, vol. 24, no. 7, pp. 537–555, 2018, doi: 10.3846/jcem.2018.6132.
- [185] A. Meyer, L. Pufahl, K. Batoulis, D. Fahland, and M. Weske, "Automating data exchange in process choreographies," *Information Systems*, vol. 53, pp. 296–329, 2015, doi: 10.1016/j.is.2015.03.008.
- [186] G. N. Schroeder, C. Steinmetz, C. E. Pereira, and D. B. Espindola, "Digital Twin Data Modeling with AutomationML and a Communication Methodology for Data Exchange," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 30, pp. 12–17, 2016, doi: 10.1016/j.ifacol.2016.11.115.
- [187] Y. Papakonstantinou, H. Garcia-Molina, and W. Jennifer, "Object Exchange Across Heterogeneous Information Sources," *Proceedings of the eleventh international conference on data engineering*, 1995.
- [188] L. Patil, D. Dutta, and R. Sriram, "Ontology-based exchange of product data semantics," *IEEE Transactions on automation science and engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 213–225, 2005.
- [189] R. Young, A. G. Gunendran, A.-F. Cutting-Decelle, and M. Gruninger, "Manufacturing knowledge sharing in PLM: a progression towards the use of heavy weight ontologies," *International Journal of Production Research*, vol. 45, no. 7, pp. 1505–1519, 2007.

- [190] M. Mani, D. Lee, and R. R. Muntz, "Semantic data modeling using XML schemas," in *International Conference on Conceptual Modeling*, 2001, pp. 149–163.
- [191] S. S. Choi, T. H. Yoon, and S. D. Noh, "XML-based neutral file and PLM integrator for PPR information exchange between heterogeneous PLM systems," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 23, no. 3, pp. 216–228, 2010.
- [192] M. J. Pratt and others, "Introduction to ISO 10303—the STEP standard for product data exchange," *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 102–103, 2001.
- [193] R. Sudarsan, S. J. Fenves, R. D. Sriram, and F. Wang, "A product information modeling framework for product lifecycle management," *Computer-Aided Design*, vol. 37, no. 13, pp. 1399–1411, 2005.
- [194] J. Whyte, N. Bouchlaghem, A. Thorpe, and R. McCaffer, "From CAD to virtual reality: modelling approaches, data exchange and interactive 3D building design tools," *Automation in construction*, vol. 10, no. 1, pp. 43–55, 2000.
- [195] BIM Deutschland, *Was ist BIM und wie funktioniert es?* [Online]. Available: <https://www.bimdeutschland.de/bim-deutschland/faq> (accessed: Oct. 31 2023).
- [196] M. Schleipen, R. Drath, and O. Sauer, "The system-independent data exchange format CAEX for supporting an automatic configuration of a production monitoring and control system," in *2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2008, pp. 1786–1791.
- [197] A. Lüder, L. Hundt, and A. Keibel, "Description of manufacturing processes using AutomationML," in *2010 IEEE 15th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2010)*, Bilbao, 092010, pp. 1–8.

- [198] A. Lüder, J.-L. Pauly, F. Rinker, and S. Biffel, "Data Exchange Logistics in Engineering Networks Exploiting Automated Data Integration," *2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, pp. 657–664, 2019. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=8851311>
- [199] *Quality management systems: Fundamentals and vocabulary*, 9000, International Standard, 2015.
- [200] *Quality management systems: Requirements*, 9001, International Standard, 2015.
- [201] IEEE Computer Society, "ISO/IEC/IEEE 90003:2018, Software engineering — Guidelines for the application of ISO 9001:2015 to computer software,"
- [202] *VDI-Richtlinie 3695: Blatt 3*, Verein Deutscher Ingenieure (VDI e.V.), May. 2021.
- [203] *VDI-Richtlinie 3695: Blatt 4*, Verein Deutscher Ingenieure (VDI e.V.), Mar. 2021.
- [204] *VDI-Richtlinie 3695: Blatt 2*, Verein Deutscher Ingenieure (VDI e.V.), Jun. 2021.
- [205] DIAMOND, *Engineering und Inbetriebnahme von Produktionsanlagen: Eine Analyse der beteiligten Prozessschritte und des entstehenden Datenflusses*. [Online]. Available: <https://diamond-project.de/dissemination/engineering-und-inbetriebnahme-von-produktionsanlagen> (accessed: Oct. 31 2023).
- [206] D. Kirwitzke and A. Schmidt, *Zielbild Planungsprozesse*.
- [207] M. Langosch, *IST-Anlagenentstehungsprozess bei BMW*. München.
- [208] R. Mader, *Ist-Anlagenentstehungsprozess*. Regensburg.
- [209] M. Langosch, C. Listl, and A. Lüder, "Digital resource models in engineering and operation – Data transformation and process changes," in *2022*

*IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 2022, pp. 1–4.

- [210] A. Lüder and N. Schmidt, “AutomationML in a Nutshell,” in *Handbuch Industrie 4.0 Bd.2*, B. Vogel–Heuser, T. Bauernhansl, and M. ten Hompel, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, pp. 213–258.
- [211] S. Unverdorben, “Architecture framework concept for definition of system architectures based on reference architectures within the domain manufacturing,” Otto–von–Guericke–Universität Magdeburg, Fakultät für Maschinenbau, 2021.
- [212] G. Janzen and S. Purr, *Metadatenmodell zur Abbildung von Planungsprozessen für Produktionssysteme*. Regensburg.
- [213] F. Brunetti, D. T. Matt, A. Bonfanti, A. de Longhi, G. Pedrini, and G. Orzes, “Digital transformation challenges: strategies emerging from a multi–stakeholder approach,” *The TQM Journal*, vol. 32, no. 4, pp. 697–724, 2020.
- [214] O. Meyer, A. Calá, G. Rauhoeft, and C. Henkel, “A harmonized approach for constructing a robust and efficient technology backbone for agile manufacturing systems,” *IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2017.
- [215] C. P. Team, “Capability maturity model\textregistered integration (CMMI SM), version 1.1,” *CMMI for systems engineering, software engineering, integrated product and process development, and supplier sourcing (CMMI–SE/SW/IPPD/SS, V1. 1)*, vol. 2, 2002.
- [216] A. de Carolis, M. Macchi, E. Negri, and S. Terzi, “A maturity model for assessing the digital readiness of manufacturing companies,” in *Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing: IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2017, Hamburg, Germany, September 3–7, 2017, Proceedings, Part I*, 2017, pp. 13–20.

- [217] FAR-EDGE consortium, "Blueprint Solutions and Strategies for Migrating to Decentralized Factory Automation Architectures – 2nd Release," 2017.
- [218] B. Stahl, R. Anderl, and J. Fleischer, *Guideline Industrie 4.0.: Guiding principles for the implementation of Industrie 4.0 in small and medium sized businesses*. Frankfurt am Main, 2016.
- [219] R. Wood and A. Bandura, "Social Cognitive Theory of Organizational Management," *Academy of Management Review*, vol. 14, no. 3, pp. 361–384, 1989.
- [220] A. Bandura, "Self-Regulation of Motivation and Action Through Goal Systems," in *Cognitive Perspectives on Emotion and Motivation*, V. Hamilton, G. H. Bower, and N. H. Frijda, Eds., Dordrecht: Springer Netherlands, 1988, pp. 37–61.
- [221] S. Luber and N. Litzel, *Was ist ein Data Steward?* [Online]. Available: <https://www.bigdata-insider.de/was-ist-ein-data-steward-a-886587/> (accessed: May 22 2023).
- [222] C. Wendelborn, M. Anger, and C. Schickhardt, "What is data stewardship? Towards a comprehensive understanding," *Journal of Biomedical Informatics*, vol. 140, p. 104337, 2023, doi: 10.1016/j.jbi.2023.104337.
- [223] S. Sinek, *Start with why*. Harlow, England: Penguin Books, 2011.
- [224] Fraunhofer Academy, *Mastering digital twins*. Zertifikatsprogramm. [Online]. Available: [https://www.academy.fraunhofer.de/de/weiterbildung/information-kommunikation/mastering\\_digital\\_twins.html](https://www.academy.fraunhofer.de/de/weiterbildung/information-kommunikation/mastering_digital_twins.html) (accessed: May 23 2023).
- [225] Fraunhofer Academy, *Product Lifecycle Management: PLM Professional*. Zertifikatsprogramm. [Online]. Available: <https://www.ipk.fraunhofer.de/de/weiterbildungen/mehrkoennen/plm-professional.html> (accessed: May 23 2023).

- [226] Mensch und Maschine Deutschland GmbH, *Ausbildung zum 3D Layoutplaner*. [Online]. Available: <https://www.mum.de/seminare/seminarueberblick/mum-ausbildung-zum-3d-layoutplaner-schulung-kurs-training> (accessed: May 23 2023).
- [227] WinMOD GmbH, *Trainings*. [Online]. Available: <https://www.winmod.de/de/leistungen/training/> (accessed: May 23 2023).
- [228] Scrum.org, *The Scrum Events*. [Online]. Available: <https://www.scrum.org/learning-series/scrum-events> (accessed: Jul. 5 2023).
- [229] *ISO 27001: Informationssicherheit, Cybersicherheit und Datenschutz – Informationssicherheitsmanagementsysteme – Anforderungen*, ISO, 2022.
- [230] H.-J. Klepzig, "Risikomanagement und Resilienz," in *Financial Supply Chain: Optimierung von Working Capital und Cashflow*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2023, pp. 249–289.

## 12 Anhang A – Gelebter Anlagenentstehungsprozess

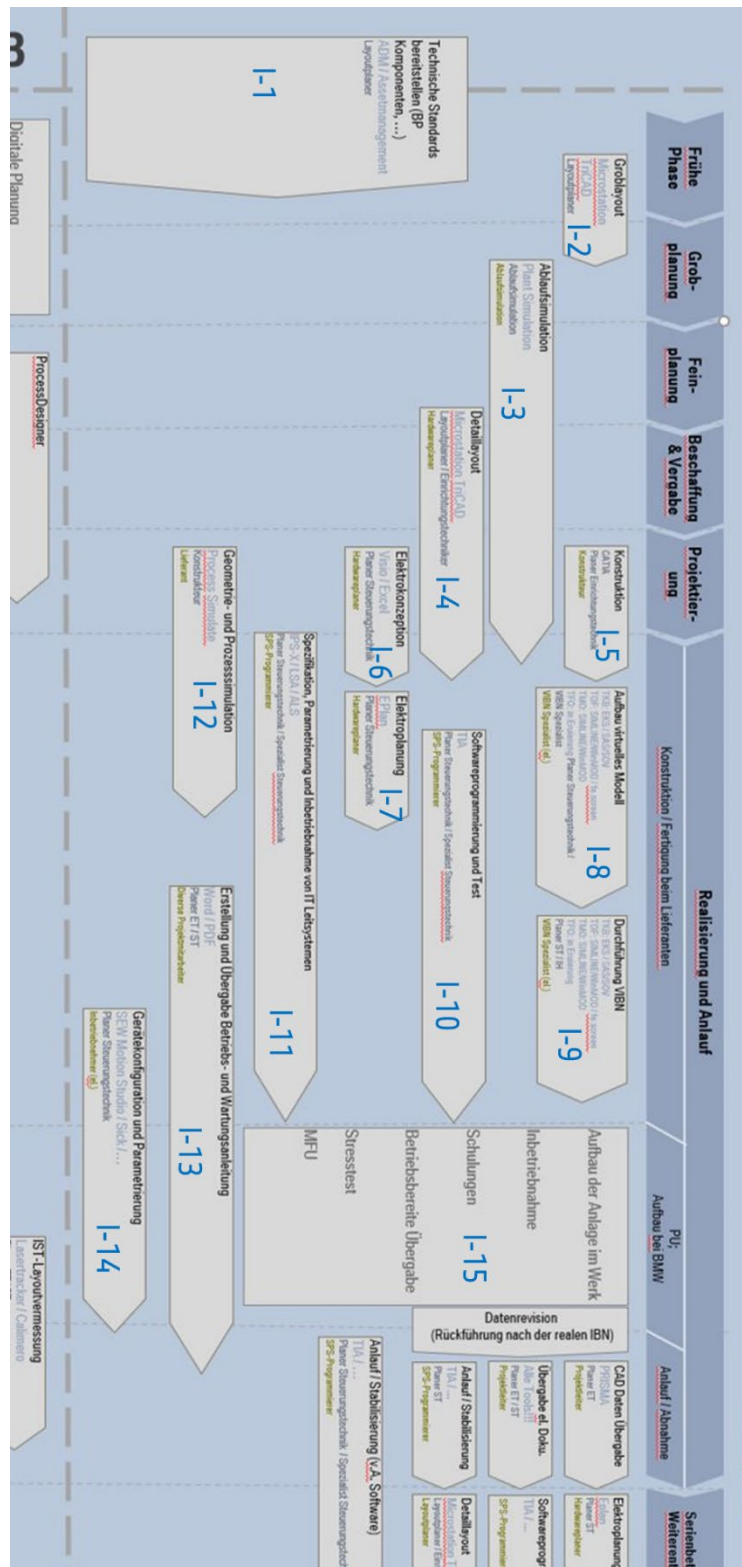


Abbildung 61: Gelebter Anlagenentstehungsprozess [207, 208]



## 13 Anhang B – SIPOC Analyse Soll–Anlagenentstehungsprozess

Prozess: Anlagenentstehungsprozess bei einem Automobilhersteller				
Lieferanten	Inputs	Prozess	Outputs	Kunden
Wer liefert Prozessinput?	Welcher Input wird benötigt?	Was sind die wichtigsten Prozessschritte?	Was sind Prozess Outputs?	Wer empfängt den Output?
Standardisierungsstellen in den Fachabteilungen, Lieferanten von Bibliotheken	Definierte Standards, mit relevanten Inhalten befüllte Bibliotheken, technische Verfügbarkeit der Standards in den Autorensystemen, technische Verfügbarkeit der Bibliothek	Technische Standards bereitstellen und Standardbibliothek vorgeben	Transparenz über zu verwendende Standards und Bibliotheken, technische Verfügbarkeit sichergestellt	Anlagenplaner, Anlagenlieferant
Fahrzeugprojekt	Definierte Prämissen, Produktanforderungen und Zeitplan	Prämissen, Produktanforderungen und Zeitplan veröffentlichen	Transparenz über Prämissen, Produktanforderungen und Zeitplan, Synchronisation des Anlagenprojekts mit Fahrzeugprojekt, Anforderungskatalog, Zeitplan Anlagenprojekt	Anlagenplaner, Anlagenlieferant, Einkauf
Fahrzeugprojekt	3D-Modell des Fahrzeugs, Metadaten des Fahrzeugs (z.B. Gewicht, Maße, Anforderungen an Materialeigenschaften, ...), technische Verfügbarkeit des virtuellen Modells	Virtuelles Produkt bereitstellen	Anforderungskatalog um Details angereichert	Anlagenplaner, Anlagenlieferant

Layoutplanung	Aktuelles 3D-Modell des Werkslayouts, Metadaten des Werkslayouts (z.B. Bezeichnungen, Koordinaten, ...), Objektorientierung des gesamten Layouts, einheitliches Bezeichnungskonzept des gesamten Layouts	Virtuelles Werkslayout bereitstellen	Rahmen und Startpunkt für Fein-Planung der Anlage liegt in der 3D-Kollaborationsumgebung vor	Anlagenplaner, Anlagenlieferant
Anlagenplanung	Referenzanlage aus Bibliothek, 3D Modell der Referenzanlage, Metadaten zur Anlage (z.B. Gewicht, Modellbezeichnung, ...)	Laden von Referenzanlage aus Bibliothek	Nutzen von Erfahrungswerten, Einsparung von Entwicklungskosten, Rahmen und Start für konkrete Projektierung	Anlagenplaner, Anlagenlieferant
Anlagenplanung	Transparenz über Verfügbarkeit einer Referenzanlage, Wirtschaftliche Betrachtung der Szenarien, Machbarkeitsstudie	Entscheidung für Neuentwicklung	Auftrag für komplette oder teilweise Neuentwicklung, Anpassung Projektplan	Anlagenplaner, Anlagenlieferant
Prozessplanung, Layoutplanung	Aktuelles 3D-Modell des Werkslayouts, Gebäudeplan, Objektorientierung in Layout- und Gebäudeplan, Logistikplanung, Simulationsparameter (z.B. Taktzeit)	Automatische Generierung Ablaufsimulation	Vollständige Ablaufsimulation inkl. Simulationsbericht	Anlagenplanung, Layoutplanung, Prozessplanung
Anlagenplanung, Layoutplanung, Prozessplanung	Vollständige Ablaufsimulation inkl. Simulationsbericht	Ergebnisse der Ablaufsimulation auswerten und ggf. Layoutplanung anpassen	Übersicht über notwendige Anpassungen oder Verbesserungsmöglichkeiten, Transparenz über Machbarkeit	Anlagenplanung, Layoutplanung, Prozessplanung

Anlagenplanung, Prozessplanung, IT	Logistikkonzept, Prozessablauf des betrachteten Fertigungsschritts, IT-Standards	Spezifikation und Parametrierung der IT-Leitsysteme	Schnittstellenbeschreibung (SPS und IT-Leitsysteme), parametrisiertes IT-Leitsystem	Anlagenplanung, Anlagenlieferant, IT
Fahrzeugprojekt, Anlagenplanung, Anlagenlieferant	Anforderungskatalog, Aktuelles Werkslayout, ggf. Referenzanlage, Bibliothek, Standards, Bezeichnungskonzept	Mechanische Konstruktion	3D-Modell der Anlage inkl. Metadaten	Anlagenplanung, Instandhaltung, Betrieb
Fahrzeugprojekt, Anlagenplanung, Anlagenlieferant	Anforderungskatalog, Aktuelles Werkslayout, ggf. Referenzanlage, Bibliothek, Standards, 3D-Modell der Anlage inkl. Metadaten, Bezeichnungskonzept	Elektroplanung	Dokumentierter Elektroplan inkl. Metadaten	Anlagenplanung, Instandhaltung, Betrieb
Elektroplanung, Anlagenplanung, Anlagenlieferant	Dokumentierter Elektroplan inkl. Metadaten, 3D-Modell der Anlage inkl. Metadaten, ggf. Referenzanlage, Bibliothek, Standards, Bezeichnungskonzept	Elektrische Konstruktion	Dokumentiertes Modell der Elektrokonstruktion inkl. Metadaten	Anlagenplanung, Instandhaltung, Betrieb
Anlagenkonstruktion, Anlagenplanung, Layoutplanung, Fahrzeugprojekt, Logistikplanung	3D-Modell der Anlage, 3D-Modell des Fahrzeugs (inkl. Metadaten und Anforderungskatalog), Prozessanforderungen (z.B. Taktzeit), Logistikkonzept, 3D-Modell des Werkslayouts	Automatische Generierung Geometrie- und Prozesssimulation	Vollständige Geometrie- und Prozesssimulation inkl. Simulationsbericht, Übersicht über notwendige Anpassungen oder Verbesserungsmöglichkeiten, Transparenz über Machbarkeit	Anlagenplanung, Layoutplanung, Fahrzeugprojekt, Logistikplanung

<p>Elektroplanung, Anlagenplanung, Anlagenlieferant, IT</p>	<p>Schnittstellenbeschreibung (SPS und IT-Leitsysteme), parametriertes IT-Leitsystem, Elektroplan, Standards, Standardbausteine</p>	<p>Softwareprogrammierung, Gerätekonfiguration und Parametrierung</p>	<p>Programmierte und parametrisierte SPS, Dokumentierte Software (TIA)</p>	<p>Anlagenplanung, Instandhaltung, Betrieb, IT, Steuerungstechnikplanung</p>
<p>Anlagenkonstruktion, Elektroplanung, Anlagenplanung, Anlagenlieferant, IT, VIBN-Experte, Steuerungstechnikplanung</p>	<p>3D-Modell der Anlage inkl. Metadaten, Schnittstellenbeschreibung (SPS und IT-Leitsysteme), parametriertes IT-Leitsystem, Elektroplan, Standards, Standardbausteine, 3D-Modell des Werkslayouts inkl. Metadaten</p>	<p>Aufbau virtuelles Modell</p>	<p>komplettes virtuelles Modell der Anlage im Layout inkl. Kinematik</p>	<p>Anlagenplanung, Instandhaltung, Betrieb, IT, VIBN-Experte</p>
<p>Elektroplanung, Anlagenplanung, Anlagenlieferant, IT, Steuerungstechnikplanung</p>	<p>2D- und 3D-Modell der Anlage inkl. Metadaten, Softwareprogramm (TIA), Herstellerinformationen der einzelnen Komponenten, Elektroplan</p>	<p>Erstellung Betriebs- und Wartungsanleitung</p>	<p>komplette Betriebs- und Wartungsanleitung</p>	<p>Instandhaltung, Betrieb</p>
<p>Anlagenkonstruktion, Elektroplanung, Anlagenplanung, Anlagenlieferant, IT, VIBN-Experte, Steuerungstechnikplanung</p>	<p>Kinematisiertes 3D-Modell der Anlage inkl. Metadaten, Schnittstellenbeschreibung (SPS und IT-Leitsysteme), parametriertes IT-Leitsystem, Elektroplan, Standards, Standardbausteine, 3D-Modell des Werkslayouts inkl. Metadaten, Testfall-Liste, Testdaten, Prozessbeschreibung</p>	<p>Automatische Generierung VIBN-Modell</p>	<p>Komplettes VIBN-Modell inkl. Transparenz über durchzuführende Tests und Testdaten</p>	<p>Anlagenplanung, Instandhaltung, Betrieb, IT, VIBN-Experte</p>

Anlagenplanung, Instandhaltung, Betrieb, IT, VIBN-Experte, Anlagenlieferant	Komplettes VIBN-Modell inkl. Tests und Testdaten	Durchführung VIBN	VIBN-Bericht inkl. LOP bis zur realen Inbetriebnahme	Anlagenplanung, Instandhaltung, Betrieb, IT, VIBN-Experte
Anlagenplanung, Instandhaltung, Betrieb, IT, Fahrzeugprojekt, Anlagenlieferant	fertige Anlage, Test-Produkte (Fahrzeuge bzw. Fahrzeugteile), Wartungs- und Betriebsanleitung, Elektroplan inkl. Schaltplan, behobene LOP-Liste aus VIBN	Aufbau und reale Inbetriebnahme	funktionsfähige Anlage, deren Verantwortung an den Betrieb übergehen kann	Instandhaltung, Betrieb, Fahrzeugprojekt

## 14 Anhang C – Fragebogen

### TT) Technische Hilfsmittel

<b>TT01</b>	<b>Wie gestaltet sich die technische Unterstützung des Anlagenentstehungsprozesses in Ihrer Organisation?</b>
Stufe 1	Es stehen keine oder nur wenige spezielle Engineering-Werkzeuge für die Bearbeitung der Aufgaben zur Verfügung.
Stufe 2	Die eingesetzten speziellen Engineering-Werkzeuge entsprechen dem Stand der Technik und stehen in einer aktuellen Version zur Verfügung.
Stufe 3	Die eingesetzten speziellen Engineering-Werkzeuge entsprechen dem Stand der Technik und die Mitarbeiter werden für diese Werkzeuge geschult.

Stufe 4	Die eingesetzten speziellen Engineering-Werkzeuge sind untereinander vernetzt und ermöglichen durchgängiges digitales Engineering.
Stufe 5	Die eingesetzten speziellen Engineering-Werkzeuge sind untereinander vernetzt und ermöglichen durchgängiges digitales Engineering. Außerdem verfügen sie bereits über KI-Funktionen, die den Planer anhand von Vorschlägen bei seiner Arbeit unterstützen.
<b>TT02</b>	<b>Gibt es in Ihrem Bereich für jeden Planer eine angemessene Hardwareausstattung?</b>
Stufe 1	Nein, vorhandene Hardware entspricht nicht dem aktuellen Stand der Technik und muss geteilt werden.
Stufe 2	Die vorhandene Hardware entspricht zwar dem Stand der Technik, muss aber geteilt werden.
Stufe 3	Jeder Mitarbeiter bekommt IT-Geräte zur Verfügung gestellt, die aber nicht komplett ausreichend ist, um seine Aufgabe in der erforderlichen Geschwindigkeit umzusetzen und keine Einschränkungen oder Kompromisse hinzunehmen sind.
Stufe 4	Jeder Mitarbeiter bekommt IT-Geräte zur Verfügung gestellt, die ihm die für seine Aufgabe erforderlichen Geschwindigkeiten, Kapazitäten und Einsatzmöglichkeiten bieten und keine Einschränkungen oder Kompromisse bei der Arbeit auferlegen.
Stufe 5	Für die informationstechnische Hardware und die Sicherstellung der Vernetzung dieser wird entsprechender Support gewährleistet.

<b>TT03</b>	<b>Unterstützen die Planungssysteme in Ihrem Bereich eine Identifizierungssystematik zur eindeutigen Kennzeichnung von Planungsobjekten?</b>
Stufe 1	Nein, denn es gibt keine Identifizierungssemantik in meinem Bereich.
Stufe 2	Nein. Es gibt zwar eine Identifizierungssystematik in meinem Betrieb, aber in meinem Bereich wird diese nicht angewendet.
Stufe 3	Nein. Es gibt zwar eine Identifizierungssystematik in meinem Bereich, meine IT-Systeme unterstützen diese jedoch nicht.
Stufe 4	Ja, meine IT-Systeme, die ich zur Planung verwende, unterstützen die Identifizierungssystematik, die für meinen Bereich festgelegt wurde.
Stufe 5	Ja, meine IT-Systeme, die ich zur Planung verwende, unterstützen die Identifizierungssystematik, die für meinen gesamten Betrieb einheitlich festgelegt wurde.
<b>TT04</b>	<b>Verfügen die Planungssysteme in Ihrem Bereich über Online-Funktionen?</b>
Stufe 1	N.A.
Stufe 2	Nein, die Funktionen meiner IT-Systeme laufen nur lokal auf meinem Rechner.
Stufe 3	Ja, es gibt vereinzelt Funktionen, die online laufen (z.B. Suchfunktion).
Stufe 4	Ja, die meisten meiner Funktionen laufen (auch) online.

Stufe 5	Vollständige Cloud Anbindung aller IT-Systeme in meinem Bereich.
<b>TT05</b>	<b>Verfügen die Planungssysteme in Ihrem Bereich über Sicherheits-Mechanismen?</b>
Stufe 1	N.A.
Stufe 2	Die Planungssysteme in meinem Bereich verfügen meines Wissens über keine besonderen Sicherheitsmaßnahmen.
Stufe 3	Die Planungssysteme in meinem Bereich sind durch Authentifizierungsmaßnahmen Zugriffsgeschützt.
Stufe 4	Die Planungssysteme in meinem Bereich sind durch Authentifizierungsmaßnahmen Zugriffsgeschützt und besitzen ein internes Rechte- und Rollenmanagement.
Stufe 5	Die Planungssysteme in meinem Bereich sind durch Authentifizierungsmaßnahmen Zugriffsgeschützt und besitzen ein internes Rechte- und Rollenmanagement sowie weitere Mechanismen zum Informationsschutz.
<b>TT06</b>	<b>Verfügen die Planungssysteme in Ihrem Bereich über die Möglichkeit, Planungsvarianten oder -versionen anzulegen und zu verwalten?</b>
Stufe 1	Nein, das Anlegen und Verwalten von Planungsvarianten oder -versionen ist in meinen IT-Systemen nicht möglich.



Stufe 2	Ja, in meinen IT-Systemen können individuell Gewerke-spezifische Versionen und Varianten angelegt und verwaltet werden.
Stufe 3	Ja, in meinen IT-Systemen können entsprechend einer bereichsweiten Vorgabe Gewerke-spezifische Versionen und Varianten angelegt und verwaltet werden.
Stufe 4	Ja, in meinem Bereich kann gewerkespezifisch jeder Stand jedes Projekts zu jedem Zeitpunkt reproduziert werden.
Stufe 5	Es existiert für das Versionen- und Variantenmanagement ein SW-Werkzeug für alle Gewerke oder eine Kette von miteinander kompatiblen Softwarewerkzeugen in den einzelnen Gewerken. Mein Betrieb ist in der Lage, jederzeit gewerke-übergreifend und mit geringem Aufwand jeden Stand jedes Projekts zu jedem Zeitpunkt zu ermitteln. Sie kann die Änderungen überwachen, reproduzieren und auditieren.

#### DT) Daten

<b>DT01</b>	<b>Gibt es einen Single Point of Access für alle Daten, die während des Planungsprozesses entstehen?</b>
Stufe 1	Nein, es gibt dafür keinen Bedarf, da entweder keine Daten entstehen oder diese nicht weitergegeben werden.
Stufe 2	Nein, die Planungsdaten, die in meinem Bereich entstehen, verbleiben lokal auf meinem Rechner oder einem Laufwerk.
Stufe 3	Die Planungsdaten, die in meinem Bereich entstehen werden auf ein zentrales Laufwerk meines Bereichs gelegt.

Stufe 4	Die Planungsdaten, die in meinem Bereich entstehen werden auf ein zentrales betriebsweites Laufwerk gelegt.
Stufe 5	Es gibt eine zentrale Datenplattform für alle Planungsdaten meines Betriebs.
<b>DT02</b>	<b>Gibt es in Ihrem Bereich eine Systematik zur eindeutigen Identifikation jedes Planungsobjekts?</b>
Stufe 1	N.A.
Stufe 2	Nein
Stufe 3	Ja, diese wird aber nicht zuverlässig angewendet.
Stufe 4	Ja, die bereichsweite Systematik muss angewendet werden.
Stufe 5	Ja, die betriebsweite Systematik muss angewendet werden.
<b>DT03</b>	<b>Werden für die Planung neuer Anlagen Daten bestehender Anlagen (z.B. Verfügbarkeit, Energieverbrauch) herangezogen?</b>
Stufe 1	Nein, solche Daten existieren in meinem Betrieb nicht.
Stufe 2	Solche Daten existieren zwar, ich habe aber keinen Zugriff darauf.
Stufe 3	Solche Daten existieren zwar, ich habe aber keine Möglichkeit, diese auszuwerten, weil ich dazu nicht die entsprechenden Werkzeuge habe oder nicht genau weiß, wie ich vorgehen muss.

Stufe 4	Ich kann eigenverantwortlich diese Daten auswerten und für mein Planungsprojekt verwenden.
Stufe 5	Die Auswertung und Verwendung historischer Daten ist fest in meinem Prozess verankert und wird mit entsprechenden IT-Systemen unterstützt.
<b>DT04</b>	<b>Werden virtuelle Modelle der Anlage bereits während des Planungsprozesses erstellt und angereichert?</b>
Stufe 1	Es gibt in meinem Bereich keine virtuellen Modelle.
Stufe 2	Die einzelnen Gewerke arbeiten individuell und erzeugen virtuelle Artefakte, die aber nicht zusammengeführt werden.
Stufe 3	Die einzelnen Gewerke arbeiten zwar individuell und erzeugen virtuelle Artefakte, diese werden aber nur partiell zusammengeführt, wenn sie nach derselben Beschreibungslogik aufgebaut sind.
Stufe 4	Durch eine übergreifend und durchgängig verwendete Beschreibungslogik (Referenzmodell) können virtuelle Artefakte der Gewerke einfach zusammengeführt werden.
Stufe 5	Durch eine übergreifend und durchgängig verwendete Beschreibungslogik (Referenzmodell) sowie durchgängige Werkzeugketten mit entsprechenden Schnittstellen können virtuelle Artefakte der Gewerke fast automatisch zusammengeführt werden.
<b>DT05</b>	<b>Wie werden Daten zwischen den Planungssystemen ausgetauscht?</b>

Stufe 1	Gar nicht.
Stufe 2	Daten können nur mit manuellem Export, einer entsprechenden Aufbereitung und anschließendem manuellem Import ausgetauscht werden.
Stufe 3	Es gibt zwischen einigen IT-Systemen direkte Schnittstellen.
Stufe 4	Es gibt standardisierte Schnittstellen, die alle IT-Systeme in der Planung bedienen können müssen.
Stufe 5	Alle IT-Systeme in der Planung können Daten in einem standardisierten Format über einen Streamingdienst in einer gemeinsamen Plattform zur Verfügung stellen.
<b>DT06</b>	<b>Gibt es ein einheitliches und übergreifendes Datenmodell für die Beschreibung von Anlagen bzw. Ressourcen?</b>
Stufe 1	Nein.
Stufe 2	Es gibt gewerkespezifisch standardisierte Datenmodelle für einzelne Komponenten.
Stufe 3	Es gibt gewerkespezifisch standardisierte Datenmodelle für Anlagen.
Stufe 4	Es gibt ein betriebsweit standardisiertes Datenmodell für Anlagen.
Stufe 5	Es gibt ein branchenweit standardisiertes Datenmodell für Anlagen, welches bei uns vorgeschrieben ist.

<b>DT07</b>	<b>Gibt es ein einheitliches und übergreifendes Datenmodell für die Kopplung zwischen Produkt, Prozess und Ressource?</b>
Stufe 1	N.A.
Stufe 2	Es gibt standardisierte Datenmodelle für wenigstens eine der Dimensionen (Produkt, Prozess, Ressource). Diese haben aber keine definierte Überschneidung.
Stufe 3	Es gibt standardisierte Datenmodelle für das Produkt, den Prozess und die Ressource. Diese haben aber keine definierte Überschneidung.
Stufe 4	Es gibt standardisierte Datenmodelle für das Produkt, den Prozess und die Ressource. Diese haben aber nur partielle Überschneidungen.
Stufe 5	Es gibt eine definierte PPR-Kopplung in meinem Betrieb, die mit den entsprechenden Datenmodellen flankiert ist.
<b>DT08</b>	<b>Wie wird die Datenqualität überwacht?</b>
Stufe 1	Gar nicht.
Stufe 2	Die Überwachung und Kontrolle finden nur individuell bei einzelnen Personen statt.
Stufe 3	Qualitätssicherungs-Maßnahmen sind im Engineering-Prozess als nachträgliche Überprüfung der eigenen Engineering-Ergebnisse vor ihrer Übergabe vorgesehen. Die dafür erforderlichen Ressourcen (Personal, Zeit) werden realistisch eingeplant.

Stufe 4	Qualitätssicherungs-Maßnahmen sind im Vorgehensmodell in mehreren Projektphasen vorgesehen. Die dafür erforderlichen Ressourcen (Personal, Zeit) werden eingeplant.
Stufe 5	Mein Betrieb zieht systematisch aus abgeschlossenen Projekten oder Projektphasen Schlüsse zur Verbesserung der Qualität der eigenen Engineering Leistung oder der Leistung der Lieferanten.
<b>DT09</b>	<b>Werden Daten aus dem Planungsprozess oder virtuelle Modelle für den Betrieb bzw. die Instandhaltung zur Verfügung gestellt bzw. weiterverwendet?</b>
Stufe 1	N.A.
Stufe 2	Nein, da keine virtuellen Modelle zur Verfügung stehen.
Stufe 3	Ja, aber diese Modelle müssen am Ende des Engineeringprozesses manuell aufwändig erstellt werden.
Stufe 4	Ja, virtuelle Modelle werden an den Betrieb übergeben.
Stufe 5	Ja, die automatisch generierten virtuellen Modelle werden direkt an den Betrieb übergeben und dort aktuell gehalten.
<b>DT10</b>	<b>Gibt es Vorgaben, welche technischen Schnittstellen die Planungssysteme bedienen können müssen?</b>
Stufe 1	N.A.

Stufe 2	Nein, es gibt keine Vorgaben.
Stufe 3	Ja, es gibt in einzelnen Bereichen spezifische Vorgaben.
Stufe 4	Ja, es gibt je Gewerk genau definierte Schnittstellen, die die IT-Systeme bedienen müssen.
Stufe 5	Ja, es gibt betriebsweis definierte Schnittstellen für jedes IT-System in der Planung.
<b>DT11</b>	<b>Werden Daten für die weitere Verwendung im Prozess aufbereitet?</b>
Stufe 1	N.A.
Stufe 2	Nein, das ist in meinem Bereich technisch nicht möglich.
Stufe 3	Nein, in meinem Bereich gibt es niemanden, der das entsprechende Know-how hat.
Stufe 4	Ja, teilweise werden spezielle Daten für die Weiterverwendung aufbereitet.
Stufe 5	Ja, alle Daten, die in meinem Bereich entstehen, werden so aufbereitet, dass sie in den nachfolgenden Prozessschritten problemlos weiterverwendet werden können.
<b>DT12</b>	<b>Wie gut sind notwendige Daten generell zugänglich für die Planer in Ihrem Bereich?</b>

Stufe 1	Gar nicht.
Stufe 2	Die zwingend benötigten Daten werden uns (z.B. per E-Mail) zur Verfügung gestellt.
Stufe 3	Die zwingend benötigten Daten werden uns zentral zur Verfügung gestellt.
Stufe 4	Alle Daten, die ich für meine Arbeit brauche, werden in meinem Bereich zentral zur Verfügung gestellt.
Stufe 5	Alle Daten zum gesamten Projekt werden für alle beteiligten Planer an einer zentralen Stelle zur Verfügung gestellt.
<b>DT13</b>	<b>Stehen den Planern in Ihrem Bereich in der frühen Planungsphase alle nötigen Daten zu Anforderungen und Rahmenbedingungen zur Verfügung (z.B. Produkthanforderungen, Kostenrahmen, Zeitrahmen, Terminalschiene, Komponentenbibliotheken, ...)</b>
Stufe 1	Nein, ich muss mir diese Daten aufwändig selbst zusammensuchen oder erfragen.
Stufe 2	Teilweise stehen mir die Daten direkt zur Verfügung, aber oftmals nicht früh genug, sodass ich entweder nachfragen muss oder nicht mit meiner Arbeit beginnen kann.
Stufe 3	Die zwingend erforderlichen Daten stehen mir zu Beginn des Projekts dezentral zur Verfügung (z.B. per E-Mail).



Stufe 4	Die zwingend erforderlichen Daten stehen mir zu Beginn des Projekts zentral zur Verfügung.
Stufe 5	Alle erforderlichen Daten stehen allen beteiligten Planern früh genug zentral zur Verfügung.
<b>DT14</b>	<b>Wo liegen finalisierte Daten und Dokumente zur Anlage ab?</b>
Stufe 1	N.A.
Stufe 2	In meinem persönlichen Laufwerk.
Stufe 3	In einem gemeinsamen Laufwerk meines Bereichs.
Stufe 4	In einem betriebsweit gemeinsamen Laufwerk.
Stufe 5	In einer zentralen Datenplattform mit Zugriffsschutz, Versionen und Variantenmanagement und Auditierungsmöglichkeit.

PT) Prozess

<b>PT01</b>	<b>Werden Erfahrungen aus vergangenen vergleichbaren Planungsprojekten nachgehalten und in aktuellen Projekten beachtet?</b>
Stufe 1	Nein, dazu gibt es keine Daten.
Stufe 2	Wenn dieselben Personen an Projekten beteiligt waren, findet ein Erfahrungsaustausch statt.

Stufe 3	In meinem Bereich gibt es ein etabliertes Vorgehen zur Einbeziehung von Erfahrungen aus vergangenen Projekten.
Stufe 4	In meinem Bereich gibt es ein fest definiertes und gelebtes Vorgehen zur Einbeziehung von Erfahrungen aus vergangenen Projekten.
Stufe 5	Es gibt ein betriebsweit definiertes Vorgehen zur Nutzung von Wissen und Erfahrung aus vergangenen Projekten.
<b>PT02</b>	<b>Wie gestaltet sich die Layoutplanung in Ihrem Betrieb?</b>
Stufe 1	N.A.
Stufe 2	Analog, mit Stift und Papier.
Stufe 3	Mit Softwareunterstützung zum Zeichnen der Layouts, aber ohne jegliche Objektorientierung.
Stufe 4	State-of-the-art Softwareunterstützung zum Zeichnen der Layouts (2D).
Stufe 5	State-of-the-art Softwareunterstützung zum Zeichnen der Layouts (3D) inkl. Objektorientierung und 3D Bibliothek.
<b>PT03</b>	<b>Inwieweit sind die Fähigkeiten für digitales Engineering in Ihrem Bereich verbreitet?</b>
Stufe 1	Keine Erfahrung mit digitalem Engineering vorhanden.
Stufe 2	Es gibt einzelne Planer, die bereits ein wenig Erfahrung damit haben.

Stufe 3	Es gibt einige Planer, die bereits Erfahrung damit haben. Es gibt auch die Möglichkeit, sich individuell weiterzubilden und an entsprechenden Maßnahmen teilzunehmen.
Stufe 4	In meinem Bereich haben alle Planer das nötige Know-how im Kontext digitalen Engineerings. Es gibt für alle verpflichtende gezielte Schulungen.
Stufe 5	In meinem Betrieb haben alle Planer hervorragendes Wissen und Fähigkeiten im Bereich digitalen Engineerings. Es gibt großflächig angelegte, aufeinander aufbauende Schulungsprogramme.
<b>PT04</b>	<b>Gibt es ein übergreifendes Vorgehensmodell für Engineeringprozesse in Ihrem Betrieb?</b>
Stufe 1	Nein.
Stufe 2	In meinem Betrieb existiert ein geeignetes Vorgehensmodell, das bei der Abwicklung von Projekten eingesetzt wird.
Stufe 3	Das Vorgehensmodell kann innerhalb definierter Grenzen an das aktuelle Projekt angepasst werden oder es existieren geeignete Varianten für verschieden geartete Projekte.
Stufe 4	Es existieren Mechanismen (z. B. Arbeitskreise, Verantwortliche, Feedbackmöglichkeiten), um das Vorgehensmodell basierend auf Projekterfahrungen in regelmäßigen Abständen weiterzuentwickeln.

Stufe 5	Das Vorgehensmodell ist so flexibel, dass es an verschiedenartige Projekte angepasst werden kann und es existieren etablierte Mechanismen zur ständigen Weiterentwicklung des Vorgehensmodells.
<b>PT05</b>	<b>Gibt es ein übergreifendes Vorgehensmodell für projektunabhängige Tätigkeiten in Ihrem Betrieb?</b>
Stufe 1	Nein.
Stufe 2	In meinem Bereich hat sich ein Vorgehensmodell für projektunabhängige Tätigkeiten etabliert.
Stufe 3	In meinem Bereich gibt es ein definiertes Vorgehen für projektunabhängige Tätigkeiten, welches stetig weiterentwickelt wird.
Stufe 4	In meinem Betrieb gibt es ein definiertes Vorgehensmodell für projektunabhängige Tätigkeiten.
Stufe 5	In meinem Betrieb gibt es ein definiertes Vorgehensmodell für projektunabhängige Tätigkeiten, welches stetig weiterentwickelt wird.
<b>PT06</b>	<b>Inwieweit wird in Ihrem Bereich Risikomanagement betrieben?</b>
Stufe 1	Gar nicht oder nicht bewusst.
Stufe 2	Das Risikomanagement wird als Teil des Projektmanagements betrachtet, das heißt, Risiken werden nicht als unvermeidbare Faktoren, denen man ausgesetzt ist und auf das man allenfalls reagieren kann, gesehen.

Stufe 3	Es wird versucht, für jedes identifizierte Risiko Eintrittswahrscheinlichkeit und mögliche Schadenshöhe zu quantifizieren, um die Risiken aus Projektmanagementsicht priorisieren zu können. Maßnahmen werden geplant und ausgeführt.
Stufe 4	Ergänzend wird am Projektende retrospektiv die Risikobetrachtung in der Hinsicht kritisch bewertet, ob es Risiken gab, die vergessen wurden und ob die Quantifizierung und die geplanten Maßnahmen angemessen waren.
Stufe 5	Ergänzend zu Stufe 4 gibt es Softwareunterstützung für Risikomanagement inkl. einiger KI-Funktionen, welche Vorschläge für Maßnahmen unterbreiten können.
<b>PT07</b>	<b>Gibt es in Ihrem Betrieb eine Plattform für die digitale Kollaboration?</b>
Stufe 1	Nein.
Stufe 2	Nein, aber ich kann innerhalb meines Gewerks in meinem Planungssystem mit Kollegen oder Lieferanten kollaborieren.
Stufe 3	Ja, es gibt eine Datenplattform, auf die meine Kollegen sowie Lieferanten Zugriff haben.
Stufe 4	Ja, es gibt eine Datenplattform sowie eine 2D-Visualisierung des Planungsstandes, den ich gemeinsam mit meinen Kollegen und/oder Lieferanten nutzen kann.

Stufe 5	Ja, es gibt eine zentrale Datenplattform sowie eine 3D-Visualisierung des Planungsstandes, den ich gemeinsam mit meinen Kollegen und/oder Lieferanten nutzen kann.
<b>PT08</b>	<b>Wie werden die Auswirkungen digitaler Technologien auf die Planungsprozesse in Ihrem Betrieb angegangen?</b>
Stufe 1	Das ist mir nicht klar.
Stufe 2	Eine oberflächliche und generelle Betrachtung hat stattgefunden.
Stufe 3	Die Auswirkungen sind analysiert worden.
Stufe 4	Die Auswirkungen sowie die damit verbundenen Maßnahmen sind analysiert und genau definiert.
Stufe 5	Die Auswirkungen sowie die damit verbundenen Maßnahmen sind bereits umgesetzt und unterliegen einem kontinuierlichen Verbesserungsprozess.

#### OT) Organisation

<b>OT01</b>	<b>Wie wird in Ihrem Bereich sichergestellt, dass das richtige Know-how für Ihre Arbeitsschritte im Kontext der digitalen Transformation vorhanden ist?</b>
Stufe 1	Gar nicht.

Stufe 2	Die Führungskraft kann individuelle Schulungsmaßnahmen festlegen.
Stufe 3	Es gibt eine Liste mit empfohlenen Schulungen für alle Planer.
Stufe 4	Es gibt pilothafte Lernpfade für einzelne Rollen, die die Planer bei der digitalen Transformation unterstützen und begleiten sollen.
Stufe 5	Es gibt verpflichtende Lernpfade für jede Rolle im Planungsprozess, die die Planer bei der digitalen Transformation unterstützen und begleiten sollen.
<b>OT02</b>	<b>Wie werden in Ihrem Betrieb die übergreifenden Verantwortlichkeiten, die für die digitale Transformation wichtig sind, geregelt?</b>
Stufe 1	Gar nicht.
Stufe 2	Es gibt je Bereich einen Verantwortlichen für die Digitalisierung der Planung.
Stufe 3	Es gibt eine ganze Organisationseinheit mit Verantwortlichen für die Digitalisierung der Planung.
Stufe 4	Es gibt bereichsspezifisch verschiedene neue Rollen, die bei der digitalen Transformation aktiv mitgestalten (z.B. Data Steward).
Stufe 5	Es gibt für jeden Bereich verschiedene neue Rollen, die bei der digitalen Transformation aktiv mitgestalten (z.B. Data Steward). Die Funktionsinhaber je Bereich haben einen etablierten Arbeitskreis und tauschen sich dort regelmäßig aus.

## ST) Simulationen

<b>ST01</b>	<b>Überprüfen Sie während der Planungsaktivität die mögliche Leistung des Produktionssystems und das Materialflussmanagement?</b>
Stufe 1	Nein, dazu fehlen die technischen Möglichkeiten und/oder die entsprechenden Daten.
Stufe 2	Für die Leistungsüberprüfung gibt es rudimentäre Werkzeuge, z.B. die Analyse von Durchschnittswerten.
Stufe 3	Für die Leistungsüberprüfung stehen einige fortgeschrittene Analyseinstrumente oder Simulationstools zur Verfügung, die z. B. auf der Warteschlangentheorie basieren.
Stufe 4	Für die Leistungsüberprüfung stehen einige fortgeschrittene Analyseinstrumente oder Simulationstools zur Verfügung. Darüber hinaus sind die Tools mit genauen Daten zu den Einschränkungen des Produktionssystems und zum Layout der Produktionsprozesspläne ausgestattet.
Stufe 5	Analysetools werden um Ergebnisse von Simulationsmodellen erweitert, wodurch automatisch Erkenntnisse über die Leistungsfähigkeit abgeleitet werden können. Darüber hinaus sind die Tools mit genauen Daten zu den Einschränkungen des Produktionssystems und zum Layout der Produktionsprozesspläne ausgestattet.
<b>ST02</b>	<b>Setzt Ihr Betrieb während der Planungsphase spezielle Simulationstools?</b>



Stufe 1	In meinem Bereich werden keine Simulationstools verwendet. Es kann reale Prototypen geben (z.B. Kartonagensimulation).
Stufe 2	In meinem Bereich gibt es zwar Simulationstools, es werden aber trotzdem weiterhin reale Prototypen verwendet.
Stufe 3	In meinem Bereich werden Simulationstools flächendeckend eingesetzt. In Ausnahmefällen finden Tests mit realen Prototypen statt.
Stufe 4	Im gesamten Planungsprozess werden flächendeckend Simulationen mit State-of-the-art Simulationstools eingesetzt. In Ausnahmefällen finden teilweise Tests mit realen Prototypen statt.
Stufe 5	Im gesamten Planungsprozess werden flächendeckend Simulationen mit State-of-the-art Simulationstools eingesetzt und sind fest im Prozess verankert. Reale Prototypen kommen kaum zum Einsatz.
<b>ST03</b>	<b>Werden 3D-Layouts, Visualisierungs- und Simulationstools für die Gestaltung des Layouts und die Inbetriebnahme der Systeme verwendet?</b>
Stufe 1	Das Layout wird mithilfe von 2D-Systemen geplant, die keine technischen Daten zu Produkten, Produktionsprozessen, Materialflüssen und Ausrüstung berücksichtigen.
Stufe 2	Das Layout wird mithilfe von 2D-Systemen geplant. Die technischen Daten zu Produkten, Produktionsprozessen, Material- und Anlagenströmen werden manuell eingegeben.

Stufe 3	Das Layout wird mithilfe von 2D-Systemen geplant. Diese Systeme sind mit anderen Konstruktionssystemen verbunden, um technische Daten zu Produkten, Prozessen/Material- und Ausrüstungsströmen zu erhalten.
Stufe 4	Das Layout wird mithilfe von 2D-Systemen geplant. Diese Systeme sind mit anderen Konstruktionssystemen verbunden, um Daten zu Produktionsprozessen, Materialflüssen und Ausrüstung zu erhalten. Einige intelligente Systeme/Algorithmen sind für eine unterstützte Layoutplanung verfügbar.
Stufe 5	Das Layout wird durch vollständig integrierte 3D-Systeme geplant. Diese Systeme sind vollständig mit anderen Konstruktionssystemen verbunden, um Daten zu Produktionsprozessen und Material- und Ausrüstungsflüssen zu erhalten. Für die schnelle Layoutentwicklung stehen einige intelligente Systeme/Algorithmen zur Verfügung. Algorithmen ermöglichen einen interaktiven Designprozesses.
<b>ST04</b>	<b>Ist die Optimierung der Produktion mithilfe von Simulationstools während der Planungsphase eine Option?</b>
Stufe 1	Solche Funktionen sind in meinem Bereich nicht vorhanden.
Stufe 2	Erfahrene Planer können unter Zuhilfenahme eigener Algorithmen bestimmte Prozesse optimieren.
Stufe 3	Erfahrene Planer mit entsprechendem Know-how können die Funktionen in Simulationstools so nutzen, dass die verschiedene Optimierungsszenarien simulieren können.

Stufe 4	Das Automatisierungssystem optimiert das Produktionssystem, indem es einen Simulationsservice bereitstellt und das Simulationsergebnis zurückerhält. Die Ableitung hinsichtlich erforderlicher Optimierungsmaßnahmen muss der Planer selbst treffen.
Stufe 5	Das Automatisierungssystem optimiert das Produktionssystem, indem es einen Simulationsservice bereitstellt und das Simulationsergebnis zurückerhält, das die erforderlichen Entscheidungen oder die erforderlichen Optimierungen empfiehlt. Die Optimierung kann automatisch erfolgen oder ein Mensch kann entscheiden.
<b>ST05</b>	<b>Werden genaue Modelle des Produktionsprozesses für die Planung von Produktionssystemen zur Verfügung gestellt?</b>
Stufe 1	Nein, es gibt keine Modelle.
Stufe 2	Ja, Modelle sind für den Produktionsprozess verfügbar, aber die Modelle sind sehr vereinfacht (mithilfe von Generalisten-Tools, z.B. Excel, implementiert).
Stufe 3	Ja, es sind Modelle für den Produktionsprozess verfügbar, die auf bestimmte Funktionen beschränkt sind (z. B. Die mechanische und strukturelle Simulation).
Stufe 4	Ja, es stehen ausgeprägte Modelle für den Produktionsprozess zur Verfügung, einschließlich verschiedener Simulationen verschiedener Prozesse.
Stufe 5	Ja, es stehen ausgeprägte Modelle für den Produktionsprozess zur Verfügung, einschließlich der Simulation aller Prozesse sowie der

	Möglichkeit zur Simulation des automatisierten Gesamtverbundes des Produktionssystems.
--	--





# 16 Anhang E – Zielbild Engineeringprozess

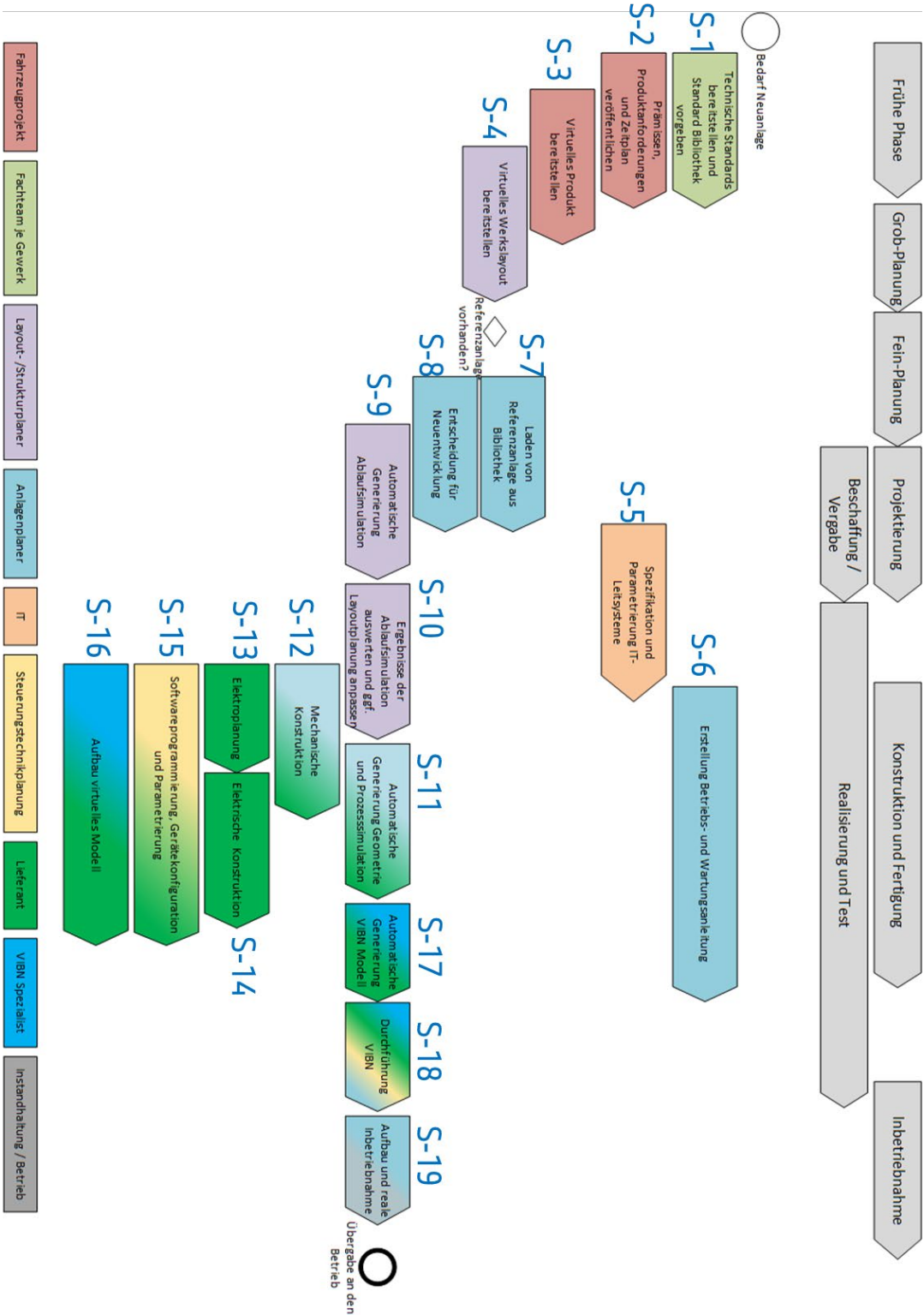


Abbildung 63: Zielbild Engineeringprozess inkl. Prozessschrittkürzel

## 17 Anhang F – Ergebnisse Interviews durch Fragebogen

	TN1	TN2	TN3	TN4	TN5	TN6	TN7	TN8			
Technische Hilfsmittel											
<b>TT01</b>											
Stufe 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	}	25
Stufe 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Stufe 3	1	1	1	1	1	1	1	1	0		
Stufe 4	0	0	0	0	0	0	0	0	1		
Stufe 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
<b>TT02</b>											
Stufe 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	}	32
Stufe 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Stufe 3	1	0	0	0	0	0	0	0	0		
Stufe 4	0	1	1	1	1	0	1	1	1		
Stufe 5	0	0	0	0	0	1	0	0	0		
<b>TT03</b>											
Stufe 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	}	26
Stufe 2	1	0	0	0	0	0	0	0	0		
Stufe 3	0	1	1	1	1	0	1	0	0		
Stufe 4	0	0	0	0	0	1	0	0	0		
Stufe 5	0	0	0	0	0	0	0	1	1		
<b>TT04</b>											
Stufe 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	}	24
Stufe 2	1	0	0	0	0	0	0	0	0		
Stufe 3	0	0	1	1	1	1	1	1	1		
Stufe 4	0	1	0	0	0	0	0	0	0		
Stufe 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
<b>TT05</b>											
Stufe 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	}	28
Stufe 2	0	0	0	0	1	1	0	0	0		
Stufe 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Stufe 4	1	1	1	1	0	0	1	1	1		
Stufe 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
<b>TT06</b>											
Stufe 1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	}	16
Stufe 2	0	1	0	1	0	0	0	1	1		
Stufe 3	0	0	0	0	0	0	1	0	0		
Stufe 4	0	0	1	0	0	0	0	0	0		
Stufe 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0		



Daten													
<b>DT01</b>													
Stufe 1	1	0	0	0	0	0	0	0	0				
Stufe 2	0	0	0	1	0	0	0	0	0				
Stufe 3	0	0	0	0	1	1	1	0	0	25	3.125		
Stufe 4	0	1	1	0	0	0	0	0	0				
Stufe 5	0	0	0	0	0	0	0	1	0				
<b>DT02</b>													
Stufe 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Stufe 2	1	0	0	0	0	0	0	0	0				
Stufe 3	0	0	1	1	1	0	1	0	0	28	3.5		
Stufe 4	0	1	0	0	0	0	0	0	0				
Stufe 5	0	0	0	0	0	1	0	1	0				
<b>DT03</b>													
Stufe 1	0	0	0	0	0	0	1	0	0				
Stufe 2	0	1	0	1	1	1	0	0	0				
Stufe 3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	21	2.625		
Stufe 4	0	0	1	0	0	0	0	0	0				
Stufe 5	0	0	0	0	0	0	0	1	0				
<b>DT04</b>													
Stufe 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Stufe 2	1	0	0	0	0	0	0	0	0				
Stufe 3	0	1	1	1	1	1	1	0	0	25	3.125		
Stufe 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Stufe 5	0	0	0	0	0	0	0	1	0				
<b>DT05</b>													
Stufe 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Stufe 2	1	0	0	0	0	1	0	0	0				
Stufe 3	0	1	1	1	1	0	1	1	1	22	2.75		
Stufe 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Stufe 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
<b>DT06</b>													
Stufe 1	1	0	0	0	0	0	1	0	0				
Stufe 2	0	0	1	0	1	1	0	0	0				
Stufe 3	0	1	0	1	0	0	0	0	0	19	2.375		
Stufe 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Stufe 5	0	0	0	0	0	0	0	1	0				
<b>DT07</b>													
Stufe 1	1	0	0	0	0	0	0	0	0				
Stufe 2	0	0	0	1	1	1	1	0	0				
Stufe 3	0	1	1	0	0	0	0	0	0	19	2.375		
Stufe 4	0	0	0	0	0	0	0	1	0				
Stufe 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
<b>DT08</b>													
Stufe 1	1	0	0	0	0	0	0	0	0				
Stufe 2	0	0	1	0	1	1	1	0	0				
Stufe 3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	20	2.5		
Stufe 4	0	0	0	1	0	0	0	1	0				
Stufe 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
<b>DT09</b>													
Stufe 1	0	0	1	0	0	0	0	0	0				
Stufe 2	0	0	0	0	1	1	0	0	0				
Stufe 3	1	1	0	1	0	0	0	0	0	23	2.875		
Stufe 4	0	0	0	0	0	0	1	0	0				
Stufe 5	0	0	0	0	0	0	0	1	0				
<b>DT10</b>													
Stufe 1	0	1	0	0	0	0	0	1	0				
Stufe 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Stufe 3	1	0	1	1	1	1	0	0	0	22	2.75		
Stufe 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Stufe 5	0	0	0	0	0	0	1	0	0				
<b>DT11</b>													
Stufe 1	1	0	0	0	0	0	0	0	0				
Stufe 2	0	0	1	0	0	0	0	0	0				
Stufe 3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	26	3.25		
Stufe 4	0	1	0	0	1	1	1	1	1				
Stufe 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
<b>DT12</b>													
Stufe 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Stufe 2	1	0	0	0	1	1	0	0	0				
Stufe 3	0	0	1	1	0	0	0	0	0	25	3.125		
Stufe 4	0	1	0	0	0	0	1	0	0				
Stufe 5	0	0	0	0	0	0	0	1	0				
<b>DT13</b>													
Stufe 1	1	0	0	0	1	1	0	0	0				
Stufe 2	0	1	1	1	0	0	0	0	0				
Stufe 3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	16	2		
Stufe 4	0	0	0	0	0	0	0	1	0				
Stufe 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
<b>DT14</b>													
Stufe 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Stufe 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Stufe 3	1	0	0	1	1	1	1	0	0	28	3.5		
Stufe 4	0	1	1	0	0	0	0	0	0				
Stufe 5	0	0	0	0	0	0	0	1	0				

Prozess													
<b>PT01</b>													
Stufe 1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	}			
Stufe 2	0	0	0	0	1	1	1	0	0				
Stufe 3	0	0	1	1	0	0	0	0	0			21	2.625
Stufe 4	0	1	0	0	0	0	0	0	1				
Stufe 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
<b>PT02</b>													
Stufe 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	}			
Stufe 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Stufe 3	1	0	1	1	0	0	1	0	0			29	3.625
Stufe 4	0	1	0	0	1	1	0	0	0				
Stufe 5	0	0	0	0	0	0	0	0	1				
<b>PT03</b>													
Stufe 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	}			
Stufe 2	0	0	0	0	1	1	1	0	0				
Stufe 3	1	1	1	1	0	0	0	0	1			21	2.625
Stufe 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Stufe 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
<b>PT04</b>													
Stufe 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	}			
Stufe 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Stufe 3	0	0	1	0	0	0	0	0	0			34	4.25
Stufe 4	1	1	0	0	0	1	0	0	1				
Stufe 5	0	0	0	1	1	0	1	0	0				
<b>PT05</b>													
Stufe 1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	}			
Stufe 2	0	0	1	0	1	1	0	0	0				
Stufe 3	0	1	0	1	0	0	0	0	0			18	2.25
Stufe 4	0	0	0	0	0	0	1	0	0				
Stufe 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
<b>PT06</b>													
Stufe 1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	}			
Stufe 2	1	0	0	0	0	1	0	0	0				
Stufe 3	0	1	0	1	0	0	1	0	0			19	2.375
Stufe 4	0	0	0	0	0	0	0	0	1				
Stufe 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
<b>PT07</b>													
Stufe 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	}			
Stufe 2	0	0	0	0	1	1	1	0	0				
Stufe 3	1	1	0	0	0	0	0	0	0			25	3.125
Stufe 4	0	0	1	1	0	0	0	0	0				
Stufe 5	0	0	0	0	0	0	0	0	1				
<b>PT08</b>													
Stufe 1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	}			
Stufe 2	0	0	0	0	1	1	1	0	0				
Stufe 3	0	0	1	0	0	0	0	0	0			22	2.75
Stufe 4	0	1	0	1	0	0	0	0	1				
Stufe 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Organisation													
<b>OT01</b>													
Stufe 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	}			
Stufe 2	0	0	0	0	1	1	0	0	0				
Stufe 3	0	0	1	0	0	0	0	0	1			28	3.5
Stufe 4	0	1	0	1	0	0	0	0	0				
Stufe 5	1	0	0	0	0	0	1	0	0				
<b>OT02</b>													
Stufe 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	}			
Stufe 2	0	0	0	0	0	0	0	0	1				
Stufe 3	1	0	1	0	0	0	0	0	0			29	3.625
Stufe 4	0	1	0	1	1	1	0	0	0				
Stufe 5	0	0	0	0	0	0	1	0	0				

Simulationen												
<b>ST01</b>												
Stufe 1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	}	28	3.5
Stufe 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Stufe 3	0	0	0	0	0	1	0	0	0			
Stufe 4	0	1	1	1	1	0	1	1	0			
Stufe 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
<b>ST02</b>												
Stufe 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	}	30	3.75
Stufe 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Stufe 3	1	0	0	1	0	0	1	0	0			
Stufe 4	0	1	1	0	1	0	0	0	1			
Stufe 5	0	0	0	0	0	1	0	0	0			
<b>ST03</b>												
Stufe 1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	}	20	2.5
Stufe 2	0	0	0	0	1	0	0	0	0			
Stufe 3	0	1	0	1	0	1	0	1	0			
Stufe 4	0	0	1	0	0	0	0	0	0			
Stufe 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
<b>ST04</b>												
Stufe 1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	}	17	2.125
Stufe 2	0	0	0	0	1	1	1	0	0			
Stufe 3	0	1	1	1	0	0	0	0	0			
Stufe 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Stufe 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
<b>ST05</b>												
Stufe 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	}	23	2.875
Stufe 2	1	0	0	0	0	1	0	0	0			
Stufe 3	0	1	1	1	1	0	1	0	0			
Stufe 4	0	0	0	0	0	0	0	0	1			
Stufe 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0			