

---

# Nachhaltigkeit in produzierenden Unternehmen durch Digitalisierung: Konzept zur Nutzung digitaler Technologien zur Erreichung und Verbesserung von Nachhaltigkeitszielen

**Sustainability in manufacturing companies through digitalization:** Conceptualizing the use of digital technologies to achieve and improve sustainability goals.

## Master-Thesis

Autor: Jannek Hündling

Matrikelnummer: 2591012

Betreuer: Enno Lang, M. Sc. | Nik Weisbrod, M. Sc. | Prof. Dr. Joachim Metternich

Abgabe: Darmstadt, 06.11.2023

© 2023. This work is openly licensed via CC BY 4.0 International



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



# Masterthesis für Jannek Hündling | 2591012



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



## Thema:

Nachhaltigkeit in produzierenden Unternehmen durch Digitalisierung:  
Konzept zur Nutzung digitaler Technologien zur Erreichung und  
Verbesserung von Nachhaltigkeitszielen

## Topic:

Sustainability in manufacturing companies through digitalization:  
Conceptualizing the use of digital technologies to achieve and improve  
sustainability goals

Institut für Produktionsmanagement,  
Technologie und Werkzeugmaschinen

Fachbereich Maschinenbau  
Otto-Berndt-Str. 2  
64287 Darmstadt

Telefon: 06151 16-20080  
Telefax: 06151 16-20087

Die Erreichung von Nachhaltigkeitszielen im Rahmen der Reduktion des globalen Einflusses produzierender Unternehmen auf den Klimawandel bedingt in vielerlei Hinsicht einen strukturellen und technologischen Wandel in industriellen Unternehmen. Führend für die Definition von Nachhaltigkeits- und Managementzielen sind dabei die Vorgaben und Empfehlungen, die in neuen Nachhaltigkeitsframeworks wie den UN Sustainable Development Goals aber auch bekannten Standards (z.B. DIN EN ISO 14001) gegeben werden.

Die Digitalisierung der Produktion hat das Potenzial, die Nachhaltigkeit produzierender Unternehmen erheblich zu verbessern. Insgesamt tragen digitale Technologien und die Produktionsdigitalisierung bedeutend zu einer nachhaltigen Zukunft bei und bieten Unternehmen die Chance, ihre Verantwortung für die Umwelt wahrzunehmen und gleichzeitig den wirtschaftlichen Erfolg zu verbessern.

In der aktuellen Nachhaltigkeitsforschung liegt der Fokus auf der Befähigung von Unternehmen für die Kreislaufwirtschaft sowie der Entwicklung von zirkulären Geschäftsmodellen. Die Forschung im Bereich der Industrie- und Produktionsdigitalisierung fokussiert sich auf die Optimierung und Verbesserung von Produktionsprozessen. Eine Forschungslücke stellt die Synthese eines Nachhaltigkeitszielsystems und eines abgeleiteten Digitalisierungskonzeptes zur Nachhaltigkeitserreichung und -verbesserung dar.


## **Zielstellung:**

In dieser Arbeit werden Forschungsergebnisse zu Nachhaltigkeits- und Digitalisierungsframeworks analysiert sowie Nachhaltigkeitszielsysteme untersucht. Ziel ist die Identifikation von Stellhebeln produzierender Unternehmen, um die Nachhaltigkeit durch den Einsatz digitaler Technologien zu erhöhen. Hierfür wird ein Konzept für den Einsatz digitaler Technologien zur Erreichung von Nachhaltigkeitszielen entwickelt.

## **Aufgaben:**

- Recherche zum Einfluss des produzierenden Gewerbes auf den Klimawandel
- Analyse aktueller Forschung zu Nachhaltigkeitsframeworks (SDGs, ISO 14001 etc.) und Digitalisierungsframeworks (Industrie 4.0, Smart Manufacturing)
- Analyse der Potenziale von digitalen Technologien (KI, IoT, Robotics, Big Data, Cloud Computing, AR&VR, 3D Printing etc.) auf Nachhaltigkeitserreichung und -verbesserung
- Identifikation von Stellhebeln produzierender Unternehmen zur Erhöhung der Nachhaltigkeit durch den Einsatz digitaler Technologien
- Entwicklung einer Systematik für den Einsatz digitaler Technologien zur Nachhaltigkeitserreichung unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitszielsystemen für die Produktion

Beginn: 08.05.2023  
Umfang: 30 CP, 900 h  
Betreuer: Enno Lang, Nik Weisbrod

  
Prof. Dr.-Ing. J. Metternich

---

# Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß §22 APB und § 23 Abs. 7 APB der TU Darmstadt

Hiermit erkläre ich, Jannek Hündling, dass ich die vorliegende Arbeit gemäß § 22 Abs. 7 APB TU Darmstadt selbstständig, ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt habe. Ich habe mit Ausnahme der zitierten Literatur und anderer in der Arbeit genannter Quellen keine fremden Hilfsmittel benutzt. Die von mir bei der Anfertigung dieser wissenschaftlichen Arbeit wörtlich oder inhaltlich benutzte Literatur und alle anderen Quellen habe ich im Text deutlich gekennzeichnet und gesondert aufgeführt. Dies gilt auch für Quellen oder Hilfsmittel aus dem Internet.

Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Mir ist bekannt, dass im Falle eines Plagiats (§38 Abs.2 APB) ein Täuschungsversuch vorliegt, der dazu führt, dass die Arbeit mit 5,0 bewertet und damit ein Prüfungsversuch verbraucht wird. Abschlussarbeiten dürfen nur einmal wiederholt werden.

Darmstadt, 29.10.2023

(Ort, Datum)

Folgende Einverständniserklärung ist unabhängig vom Prüfungsverfahren zur Masterprüfung (ein Exemplar verbleibt bei den Prüfungsakten) und ohne Einfluss auf die Bewertung der Master-Thesis.

Ich bin damit einverstanden, dass eine zweite angepasste Ausführung der Master-Thesis, in der die Experten-Interviews gemäß der Absprache mit den Experten anonymisiert wurden, in den Bibliotheksbestand der TU Darmstadt aufgenommen wird und öffentlich zugänglich gemacht wird.

Darmstadt, 29.10.2023

(Ort, Datum)

Die TU Darmstadt bittet Sie im Interesse eines freien Informationsaustausches, ihr Urheberrecht an der Arbeit zu wissenschaftlichen Zwecken nutzen zu dürfen. Sie können die Nutzung Ihres Urheberrechts durch die TU Darmstadt ohne Angabe von Gründen und ohne nachteilige Folgen für die Bewertung der Arbeit verweigern.

Ich bin damit nicht einverstanden, dass die TU Darmstadt das Urheberrecht an meiner Master-Thesis zu wissenschaftlichen Zwecken nutzen kann.

Darmstadt, 29.10.2023

(Ort, Datum)

---

# Kurzfassung & Abstract

**Stichwörter:** Digitalisierungsprojektmanagement, Produktionsmanagement, Prozessmodell

Diese Arbeit zeigt, dass die Integration von Nachhaltigkeit und Digitalisierung entscheidend für die Zukunft der produzierenden Industrie ist. Digitale Technologien werden als wichtige Treiber für den Erfolg der Nachhaltigkeitstransformation in Industrieunternehmen identifiziert. Die Arbeit zeigt ebenfalls, dass die steigende Zahl an Nachhaltigkeitsstandards sowie die strenger werdenden gesetzlichen Anforderungen die Digitalisierung in der produzierenden Industrie vorantreiben. Digitale Technologien haben einen positiven Einfluss auf die ökologische, die soziale und die wirtschaftliche Nachhaltigkeit der Unternehmen, in denen diese implementiert werden. Die Design Science Research (DRS) Methodologie wird angewendet, um einen nachhaltigkeitsintegrierten Ansatz für die Nutzung von digitalen Technologien zu entwickeln. Dabei wird das SIA-DT (Sustainability Integrated Approach for Digital Technologies) Prozessmodell entworfen, welches ermöglicht, digitale Technologien nachhaltigkeitsorientiert zu implementieren. Das Modell beschreibt einen Managementprozess der Nachhaltigkeit, im Digitalisierungsprojektmanagement in der Produktion, integriert. Die Entwicklung des SIA-DT Prozessmodells stützt sich auf zehn Design Empfehlungen zur Integration von Nachhaltigkeit in Managementprozesse aus der Forschung. Das entwickelte Prozessmodell besitzt Schnittstellen zu Managementsystemen nach der Norm DIN EN ISO 14001:2015 und fördert hierdurch die Verknüpfung von Nachhaltigkeitsmanagement und Digitalisierungsmanagement in der Produktion. Das SIA-DT Prozessmodell wird abschließend durch Experten/Expertinnen Interviews evaluiert.

**Keywords:** digitalization project management, production management, process model

The thesis shows that the integration of sustainability and digitalization is crucial for the future of the manufacturing industry. The thesis identifies the digital technologies as important drivers for the success of sustainability transformation in industrial companies. The increasing number of sustainability standards as well as the stricter legal requirements drive digitalization in the manufacturing industry. Digital technologies have a positive impact on the environmental, social, and economic sustainability of the companies in which they are implemented. The Design Science Research (DSR) methodology is applied to develop a sustainability integrated approach for digital technologies (SIA-DT). In this context, the SIA-DT process model is developed. The process model enables the implementation of digital technologies in production in a sustainability-oriented way. The model describes a management process that integrates sustainability into project management for digitalization in production. The development of the SIA-DT process model is based on ten design recommendations from research for the integration of sustainability in management processes. The SIA-DT process model has interfaces to management systems according to the international DIN EN ISO 14001:2015 standard and therefore promotes to the linking of sustainability management and digitalization management in production. The SIA-DT process model is evaluated by expert interviews.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>ERKLÄRUNG ZUR ABSCHLUSSARBEIT GEMÄß §22 APB UND § 23 ABS. 7 APB DER TU DARMSTADT</b> .....	<b>I</b>
<b>KURZFASSUNG &amp; ABSTRACT</b> .....	<b>II</b>
<b>INHALTSVERZEICHNIS</b> .....	<b>III</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>VI</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>VII</b>
<b>SYMBOLVERZEICHNIS</b> .....	<b>VIII</b>
<b>INDIZES</b> .....	<b>IX</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>X</b>
<b>1 EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
<b>2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1 Relevanz von Nachhaltigkeit für die Industrie</b> .....	<b>3</b>
2.1.1 Industrie im Kontext des Klimawandels.....	3
2.1.2 Abkommen zum Klimawandel .....	4
<b>2.2 Nachhaltigkeitsbegriff</b> .....	<b>5</b>
2.2.1 Nachhaltigkeitsdefinition .....	6
2.2.2 Nachhaltigkeitsdimensionen.....	7
<b>2.3 Systematisierung und Bewertung von Nachhaltigkeit</b> .....	<b>9</b>
2.3.1 Umweltmanagementsysteme .....	9
2.3.2 Nachhaltigkeitszielsysteme .....	11
2.3.3 Zusammenhänge zwischen Nachhaltigkeitsrahmenwerken.....	14
2.3.4 Sustainable Development Goals .....	15
2.3.5 Planetare Grenzen.....	17
2.3.6 Internationale Normen .....	19
2.3.7 Sustainability Balanced Scorecard .....	22
2.3.8 Circular Economy .....	23
<b>2.4 Nachhaltigkeitsziele in Industrieunternehmen</b> .....	<b>24</b>
2.4.1 Strategische Nachhaltigkeitsziele.....	25
2.4.2 Operative Nachhaltigkeitsziele .....	26

<b>2.5 Modelle der Nachhaltigkeitsbewertung .....</b>	<b>29</b>
2.5.1 Nachhaltigkeitsreifegradmodelle .....	29
2.5.2 Life Cycle Assessment .....	31
2.5.3 Sustainability Quality Function Deployment.....	34
<b>2.6 Nachhaltigkeit in Digitalisierungskonzepten .....</b>	<b>36</b>
2.6.1 Industrie 4.0 .....	37
2.6.2 Industrie 5.0 .....	39
<b>2.7 Stellhebel, Fokusbereiche und Anwendungsfälle .....</b>	<b>41</b>
2.7.1 Wichtige Bereiche für die Implementierung digitaler Technologien.....	41
2.7.2 Stellhebel für die Erreichung von Nachhaltigkeitszielen.....	42
2.7.3 Anwendungsfälle digitaler Technologien zur Nachhaltigkeitserreichung .....	43
<b>3 FORSCHUNGSMETHODOLOGIE .....</b>	<b>47</b>
<b>3.1 Design Science Research Methodologie.....</b>	<b>47</b>
<b>3.2 Vorgehensweise .....</b>	<b>49</b>
<b>4 DESIGN EINES NACHHALTIGKEITSGETRIEBENEN DIGITALISIERUNGSPROZESSES.....</b>	<b>51</b>
<b>4.1 Prozessmodellierung .....</b>	<b>51</b>
4.1.1 IDEF3 .....	51
4.1.2 Wertstromanalyse.....	52
4.1.3 BPMN 2.0.....	54
<b>4.2 Vorgehensmodelle für die Technologieimplementierung.....</b>	<b>57</b>
4.2.1 Stage Gate .....	57
4.2.2 CRISP-DM und DMME .....	59
<b>4.3 SIA-DT Definition und Struktur.....</b>	<b>63</b>
4.3.1 Einbettung ins Qualitätsmanagementsystem .....	64
4.3.2 DMME-Schritte im SIA-DT .....	66
4.3.3 Stage-Gate als Grundmodell des SIA-DT .....	67
4.3.4 Kontinuierliche Verbesserung.....	68
<b>4.4 SIA-DT Prozessmodellierung in BPMN 2.0.....</b>	<b>70</b>
<b>4.5 Design Empfehlungen aus der Forschung .....</b>	<b>74</b>
<b>4.6 Exklusive SIA-DT Prozessschritte .....</b>	<b>76</b>
4.6.1 Strategische Bewertung des Nachhaltigkeitsreifegrads und -potenzials.....	76
4.6.2 Business-Case für Nachhaltigkeit .....	77
4.6.3 Nachhaltigkeits- und Risikoanalyse von Technologieoptionen.....	79

---

4.6.4 Detaillierte Nachhaltigkeits- und Risikobewertung des technischen Konzepts.....	80
4.6.5 Kontinuierliche Datenerfassung und Speicherung von Nachhaltigkeitsdaten .....	82
<b>5 EVALUATION DES SIA-DT .....</b>	<b>85</b>
<b>5.1 Interviewplanung .....</b>	<b>85</b>
<b>5.2 Interviewablauf.....</b>	<b>86</b>
<b>5.3 Diskussion .....</b>	<b>89</b>
5.3.1 Einsatz des SIA-DT als Managementprozess .....	89
5.3.2 Umweltmanagementsysteme und Einbettung des SIA-DT Prozesses .....	91
5.3.3 Nachhaltigkeitsziele und klassische Ziele.....	93
5.3.4 Hürden und Anreize für den SIA-DT Prozess.....	94
5.3.5 Integration der kontinuierlichen Verbesserung.....	95
5.3.6 Integration des DMME und SIA-DT .....	96
5.3.7 Arbeitsschritte und Rollen bei Digitalisierungsprojekten und im SIA-DT Prozess .....	97
5.3.8 Integration und Synergieeffekte zwischen Technologien.....	99
<b>6 FAZIT .....</b>	<b>101</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>XIV</b>
<b>ANHANG.....</b>	<b>VII</b>

---

# Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b> Anteil der Industrie am weltweiten Stromverbrauch .....	4
<b>Abbildung 2:</b> Wechselwirkungen zwischen Industrie und Umwelt .....	8
<b>Abbildung 3:</b> System, Umwelt und Prozesse .....	10
<b>Abbildung 4:</b> Die 17 SDGs mit den standardisierten Icons der UN.....	16
<b>Abbildung 5:</b> Planetare Grenzen des Stockholm Resilience Center .....	19
<b>Abbildung 6:</b> Grafische Darstellung eines UMS nach der Norm DIN EN ISO 14001 und des PDCA-Zyklus	21
<b>Abbildung 7:</b> Existierende Zielsysteme und deren Anwendungsbereiche .....	25
<b>Abbildung 8:</b> KPIs entlang der verschiedenen Ebenen in der Industrie .....	27
<b>Abbildung 9:</b> Aufbau eines Reifegradmodells für Klimaneutralität und Digitalisierung.....	30
<b>Abbildung 10:</b> Die ökologische Sicht auf den PLC.....	32
<b>Abbildung 11:</b> Arbeitsablauf der LCA in 4 Phasen .....	33
<b>Abbildung 12:</b> Schematischer Aufbau einer SQFD.....	36
<b>Abbildung 13:</b> DSR-Methodologie .....	47
<b>Abbildung 14:</b> Grundmodell des Stage Gate Prozesses.....	59
<b>Abbildung 15:</b> CRISP-DM Prozessmodell .....	61
<b>Abbildung 16:</b> DMME und SIA-DT.....	63
<b>Abbildung 17:</b> Einbettung des SIA-DT in ein UMS nach der Norm DIN EN ISO 14001.....	65
<b>Abbildung 18:</b> SIA-DT Prozessmodell als Stage Gate dargestellt.....	68
<b>Abbildung 19:</b> Wirkungsweise der kontinuierlichen Verbesserung .....	69
<b>Abbildung 20:</b> BPMN 2.0 Darstellung des SIA-DT Prozessmodells .....	73



---

# Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b> Kurzvorstellung der für die Industrie relevanten Nachhaltigkeitsrahmenwerke.....	13
<b>Tabelle 2:</b> Targets für das SDG 9 Industrie, Innovation und Infrastruktur.....	17
<b>Tabelle 3:</b> Die wichtigsten Bereiche für strategische Ziele in der Industrie.....	26
<b>Tabelle 4:</b> Auswahl von operativen KPIs für Fertigungsprozesse .....	28
<b>Tabelle 5:</b> Empfehlungen der Europäischen Kommission zur Adjustierung des Industrie 4.0 Konzepts ..	39
<b>Tabelle 6:</b> Unterschiede von Industrie 4.0 und Industrie 5.0 .....	40
<b>Tabelle 7:</b> Vergleich der drei Modellierungskonventionen .....	55
<b>Tabelle 8:</b> Stakeholder und Ansprüche an ein BPMN 2.0 Modell.....	56
<b>Tabelle 9:</b> Zur Modellierung des SIA-DT Prozesses verwendete BPMN 2.0 Elemente .....	71
<b>Tabelle 10:</b> Design Empfehlungen aus der Forschung .....	75
<b>Tabelle 11:</b> Übersicht über mögliche Methoden der ökonomischen Projektbewertung.....	78
<b>Tabelle 12:</b> Interviewplanung der Experten/Expertinnen-Interviews .....	86
<b>Tabelle 13:</b> Fragensauswahl aus Interviewleitfaden für die Experten/Expertinnen-Interviews.....	88

---

# Symbolverzeichnis

## Basissystem

Die erste Spalte der folgenden Liste zeigt die im Text verwendeten Symbole für die auftretenden physikalischen und mathematischen Größen. In der zweiten Spalte wird die Bedeutung des Symbols beschrieben. Die Dimensionsformel jeder physikalischen Größe ist als Potenzprodukt der Basisgrößen Länge (L), Masse (M), Zeit (T), Temperatur ( $\Theta$ ), Stoffmenge (N), Strom (I) und Lichtstärke (J) in der Spalte 3 angegeben.

Symbol	Bedeutung	Dimension
$^{\circ}\text{C}$	Grad Celsius	$\Theta^1$
<b>AND</b>	Boolescher Operator UND	
<b>dB</b>	Dezibel	
<b>h</b>	Stunde (äquivalent zu 60 min)	$T$
<b>kg</b>	Kilo Grammoperative	$M^1$
<b>kWh</b>	Kilowattstunde	$L^2 M T^{-2}$
<b>l</b>	Liter	$L^3$
<b>m<sup>3</sup></b>	Kubikmeter	$L^3$
<b>mg</b>	Milligramm	$M^1$
<b>min</b>	Minute	$T$
<b>OR</b>	Boolescher Operator ODER	
<b>t</b>	Tonne (entspricht 1000 kg)	$M^1$
<b>XOR</b>	Boolescher Operator Exklusives ODER	
<b>n</b>	Beliebige ganze Zahl	

---

# Indizes

Die nachfolgende Auflistung zeigt die in dieser Arbeit verwendeten Indizes. Die erste Spalte bildet die Indizes ab. In der zweiten Spalte werden diese Indizes erklärt. Innerhalb der Arbeit werden gängige Indizes, aber auch selbst definierte Indizes genutzt. Die Indizes sind in alphabetisch absteigender Reihenfolge sortiert.

## Indizes

pc.	Piece (deutsch: Teil)
pcs.	Pieces (deutsch: Teile)

---

# Abkürzungsverzeichnis

Die nachfolgende Auflistung zeigt die in dieser Arbeit verwendeten Abkürzungen. Die erste Spalte beinhaltet die Abkürzungen. In der zweiten Spalte werden die verwendeten Abkürzungen erklärt. Innerhalb der Arbeit werden gängige Abkürzungen, aber auch selbst definierte Abkürzungen genutzt. Die Abkürzungen sind in alphabetisch absteigender Reihenfolge sortiert.

## Abkürzungen

5M	Mensch, Maschine, Material, Methode, Mitwelt
6R	Recognise, Reconsider, Realize, Reduce, Reuse/Repair, Recycle
7M	5M, Messbarkeit, Management
AI	Artificial Intelligence
AM	Additive Manufacturing
BPR	Business Process Reengineering
BSC	Balanced Scorecard
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Usage
CE	Circular Economy
CF	Carbon Footprint
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
COVID-19	Coronavirus SARS-CoV-2
CPS	Cyber Physische Systeme
CRISP-DM	Cross Industry Standard Protocol for Data Mining
CSR	Corporate Social Responsibility
CSRD	Corporate Sustainability Reporting Directive
DA	Data Availability

---

DFMEA	Design Failure Mode and Effects Analysis
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMME	Data Mining Methodology for Engineering
DMS	Distributed Manufacturing Systems
DR	Digitization Rate
DSR	Design Science Research
DU	Data Usage
DVSM	Digital Value Stream Mapping (angepasste VSM-Methode)
EMAS	Eco-Management and Audit Scheme
EN	Europäische Norm
EY	Ernst & Young
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
FORD PSI	Ford Product Sustainability Index
GHG	Greenhouse Gas
GRI	Global Reporting Initiative
HoS	House of Sustainability
HR	Human Resources
IASB	International Accounting Standards Board
IDEF3	Integrated Definition for Process Description Method
IFRS	International Financial Reporting Standards
IIoT	Industrial IoT
IoT	Internet of Things
ISO	Internationale Organisation für Standardisierung
ISSB	International Sustainability Standards Board

---

IT	Informationstechnik
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KPI	Key Performance Indicators
LCA	Life Cycle Assessment
LCE	Life Cycle Engineering
MES	Manufacturing Execution System
NIST	National Institute of Standards and Technology
OEM	Original Equipment Manufacturer
OPC-UA	Open Platform Communications Unified Architecture
OT	Operational Technology
PB	Planetary Boundaries
PDCA	Plan-Do-Check-Act
PEP	Produktentstehungsprozess
PLC	Produkt Lebenszyklus, Product Life Cycle
QFD	Quality Function Deployment
RPZ	Risiko Prioritätszahl
RPZ	Risikoprioritätszahlen
SAP	Systemanalyse Programmentwicklung
SAT	Sustainability Assessment of Technologies
SBSC /SBS	Sustainability Balanced Scorecard
SDG	Sustainable Development Goals
SIA-DT	Sustainability Integrated Approach for Digital Technologies
SLCA	Social Life Cycle Assessment

---

SME	Small and Medium Enterprises
SQFD	Sustainability Quality Function Deployment
TBL	Triple Bottom Line
TQM	Total Quality Management
TU	Technische Universität
UMS	Umweltmanagementsystem
UN	United Nations
VSM	Value Stream Mapping
VSM 4.0	Value Stream Mapping 4.0 (angepasste VSM-Methode)
VUCA	Volatile, Uncertain, Complex, Ambiguous

---

## 1 Einleitung

---

Die digitale Transformation ist einer der wichtigsten Hebel zur Erreichung einer nachhaltigen Industrie. Technologien wie das Internet der Dinge, Robotik, Daten Analyse, künstliche Intelligenz (KI; auch: Artificial Intelligence, AI), virtuelle Realität (VR) und erweiterte Realität (englisch: Augmented Reality, AR) sowie Blockchain besitzen das Potenzial, Transparenz in der Wertschöpfung zu verbessern, die Flexibilität und Resilienz der Produktion zu steigern und neue Produkte schneller und anforderungsgerechter sowie nachhaltiger zu produzieren. Die Digitale Transformation ist eine Top-Priorität der Europäischen Union (englisch: European Union, EU) und wird immer häufiger als Schlüssel zur Erreichung von Nachhaltigkeit genannt (vgl. Samoylova et al. 2023, S. 16).

Der Klimawandel ist ein Megatrend, welcher die Zukunft der produzierenden Industrie bestimmt. Der Beitrag der Industrie zum weltweiten CO<sub>2</sub> Ausstoß ist durch den Energieverbrauch und dem Einsatz von CO<sub>2</sub> in Prozessen hoch. Weltweit sind Anstrengungen zur Reduktion von schädlichen Einflüssen notwendig (vgl. Abele. 2011, S. 21). Industrie 4.0 bezeichnet die vierte Revolution der Industrie. Mit digitalen Technologien und vernetzten Produkten und Prozessen kann die Effizienz der Produktion verbessert werden. Neben der wirtschaftlichen Verbesserung tragen die Technologien aber auch dazu bei, ökologische und soziale Ziele des Unternehmens zu erreichen (vgl. Bai et al. 2020, S. 1). Die Erreichung von Nachhaltigkeitszielen im Rahmen der Reduktion des Einflusses von Industrieunternehmen auf die Umwelt bedingt einen strukturellen und technologischen Wandel in vielen Unternehmen. Neue Anforderungen an die Unternehmen, bspw. durch neue Standards, Normen aber auch durch Gesetze wie dem Lieferketten-Sorgfaltspflichten-Gesetz erzeugen einen hohen Druck für Unternehmen, die Verbesserung der Nachhaltigkeit und die Erreichung von Nachhaltigkeitszielen zu fokussieren. Da digitale Technologien in allen Unternehmensbereichen immer wichtiger werden, um Nachhaltigkeitsziele und Vorgaben aus Standards, Normen und Vorgaben zu erreichen, ist die systematische Verknüpfung von Nachhaltigkeitsstandards und -zielen mit Managementprozessen für die Digitalisierung ein wichtiger Schritt zur Erreichung und Optimierung der Nachhaltigkeitsziele.

Die Literatur und Einschätzungen von Experten/Expertinnen zeigen, dass die neuen Anforderungen durch Standards und Gesetze ohne Digitalisierung kaum zu erfüllen sind. So sind bspw. die Anforderungen aus der CSRD (Corporate Sustainability Reporting Directive) so umfangreich, dass die Bereitstellung der Nachhaltigkeitsdaten nicht ohne Digitalisierung zu stemmen ist (vgl. Anhang 9, U13). Neben den Anforderungen durch Vorgaben und Standards spielen aber auch die gestiegenen Kundenanforderungen für Unternehmen eine wichtige Rolle. Die Nachhaltigkeit von Produkten und Unternehmen wirkt sich direkt auf die Attraktivität der Unternehmen und der Produkte für Investoren und Kunden aus (vgl. Yadav et al. 2016, S. 402). Unternehmen stehen also vor dem Problem, das aktuelle Ansätze der Systematisierung von Nachhaltigkeit im Unternehmen zukünftig mit digitalen Technologien verknüpft werden müssen, um den Anforderungen von Stakeholdern und Regularien nachkommen zu können. Die Verknüpfung von digitalen Technologien in der Fertigung mit dem Nachhaltigkeitsmanagement muss dazu beitragen, dass Unternehmen durch die Implementierung von datengetriebenen Technologien systematisch verbesserte und automatisierte Datengrundlagen schaffen, um Daten wie CO<sub>2</sub>-Emissionen, Energie- und Materialverbräuche und andere nachhaltigkeitsrelevante Kennzahlen zu erheben.



---

Mit dieser Forschungsarbeit sollen aktuelle Ansätze (Contini und Peruzzini. 2022; Metternich und Kreß. 2023; Seyfried et al. 2023) welche versuchen die Digitalisierung und Nachhaltigkeit in industriellen Unternehmen zu vereinen, erweitert werden. Die Arbeit folgt dem Design Science Research Ansatz und untersucht die Forschungslücke, wie die Digitalen Technologien systematisch zur Erreichung oder Verbesserung von Nachhaltigkeitszielen genutzt werden können. Es wird untersucht, welche Nachhaltigkeitsstandards und -ziele in Unternehmen eine wichtige Rolle im Management von Nachhaltigkeit spielen und wie ein systematischer Ansatz zur Nutzung von digitalen Technologien zur Erreichung der Ziele gestaltet werden muss. Es wird ebenfalls untersucht welche Stellhebel von Experten/Expertinnen als besonders wichtig eingeschätzt werden, um die Nachhaltigkeit im Unternehmen zu steigern.

Um den Ansatz zu entwickeln, wird auf aktuelle Forschungen zurückgegriffen. Neben der aktuellen Forschung die beschreibt, dass digitale Technologien ein wesentlicher Treiber für die Erreichung von Nachhaltigkeitszielen sind, gibt es auch ältere Forschungen die schon frühzeitig die Bedeutung der Berücksichtigung von Nachhaltigkeitszielen in Geschäftsprozessen erkannten (vgl. Whiteman et al. 2013, S. 307–308). Einige besonders wichtige dieser Forschungen werden ebenfalls untersucht. Die aktuelle industrielle Forschung beschäftigt sich hauptsächlich mit der Identifikation von strategischen Nachhaltigkeitspotenzialen. Basierend auf den Ergebnissen einer kurzen Recherche, ist identifiziert worden, dass bisher kein Management-Prozess entwickelt wurde, welcher die Nutzung digitaler Technologien zur Erreichung von qualitativen und quantitativen Nachhaltigkeitszielen systematisiert. Für die Entwicklung eines solchen Prozesses wird der Kontext der Industrie in Bezug auf den Klimawandel untersucht und Nachhaltigkeitszielsysteme analysiert. Es werden theoretische Grundlagen zur Nachhaltigkeit, wie der Begriff der Nachhaltigkeit und die in produzierenden Unternehmen wichtigen Dimensionen der Nachhaltigkeit untersucht und strategische und operative Nachhaltigkeitsziele für produzierende Unternehmen vorgestellt. Die wichtigsten Methoden, Nachhaltigkeit und Nachhaltigkeitspotenziale zu identifizieren werden vorgestellt und aktuelle Anwendungsfälle von digitalen Technologien in der Produktion zur Nachhaltigkeitserreichung betrachtet. Stellhebel, welche die Nachhaltigkeitserreichung treiben, werden identifiziert. Für den Entwurf des Managementprozesses werden die wichtigsten Modellierungskonventionen für technische Prozesse und Geschäftsprozesse untersucht. Aufbauend darauf wird ein geeignetes Modellierungskonzept ausgewählt und das Prozessmodell entwickelt. Der Managementprozess soll Industrieunternehmen helfen, den Einsatz digitaler Technologien unter Nachhaltigkeitszielbezug systematisch zu managen. Die aktuelle Forschung zur Nachhaltigkeitssteigerung durch Digitalisierung wird damit um einen systematischen Ansatz zur Nutzung von digitalen Technologien für die Nachhaltigkeitserreichung und -verbesserung erweitert. Dem Digitalisierungsmanagement in Industrie-Unternehmen soll ein wissenschaftlich erarbeiteter und begründeter systematischer Ansatz für die nachhaltigkeitszielorientierte Implementierung von digitalen Technologien vorgeschlagen werden.

Das im Rahmen der Arbeit entwickelte Prozessmodell soll mittels Experten/Expertinnen-Interviews evaluiert werden. Dabei werden Experten/Expertinnen zur Einschätzung der Bedeutung digitaler Technologien für die Erreichung von Nachhaltigkeitszielen, zum aktuellen Einsatz digitaler Technologien in der Produktion, der Bedeutung von Standards und Regularien zu Nachhaltigkeit, Managementsystemen und den Phasen und Schritten des entwickelten Modells befragt. Es wird überprüft, welche Potentiale und Limitationen das Prozessmodell besitzt. Außerdem wird untersucht, welche Eigenschaften Unternehmen besitzen müssen, in denen der Prozess implementiert werden soll.

---

## 2 Theoretische Grundlagen

---

Das Kapitel der theoretischen Grundlagen präsentiert die Ergebnisse einer Literaturrecherche zum Thema Digitalisierung und Nachhaltigkeit. Dazu wird zunächst die Relevanz des Themas beschrieben. Die wichtigsten theoretischen Grundlagen zum Begriff der Nachhaltigkeit und die für das produzierende Gewerbe wichtigen Dimensionen von Nachhaltigkeit werden vorgestellt. Die Bedeutung der Systematisierung der Nachhaltigkeit (bspw. durch Umweltmanagementsysteme) wird erläutert und die wichtigsten Rahmenwerke und Standards in diesem Bereich verglichen. Aufbauend auf diesem Wissen werden strategische und operative Nachhaltigkeitsziele für die produzierende Industrie betrachtet. Es werden einige wichtige Modelle vorgestellt, die in Prozessen zur Bewertung und Quantifizierung von Nachhaltigkeit genutzt werden können. Die Verknüpfung zur Digitalisierung wird geschaffen, indem vorgestellt wird, wie aktuelle Digitalisierungskonzepte die Dimensionen der Nachhaltigkeit und die Nutzung von digitalen Technologien zur Erreichung von Nachhaltigkeit verbinden. Für einige wichtige digitale Technologien werden kurz aktuelle Einsatzmöglichkeiten vorgestellt. Abschließend werden auf Grundlage von Daten aus Experten/Expertinnen-Interviews, die wichtigsten Stellhebel und Bereiche für den Einsatz digitaler Technologien zusammengefasst.

### 2.1 Relevanz von Nachhaltigkeit für die Industrie

Ohne Nachhaltigkeit wird keine verarbeitende Industrie längerfristig bestehen können, da alle verarbeitenden Industrien auf Materialien und Rohstoffe angewiesen sind, die der Umwelt entnommen werden und ohne nachhaltige Prozesse nicht unbegrenzt verwendet werden können. Die Management Forschung rückt die Bedeutung von Nachhaltigkeitszielsystemen schon seit Mitte der 90er Jahre ins Zentrum der betrieblichen Management- und Entscheidungsprozesse (vgl. Gladwin et al. 1995, 874).

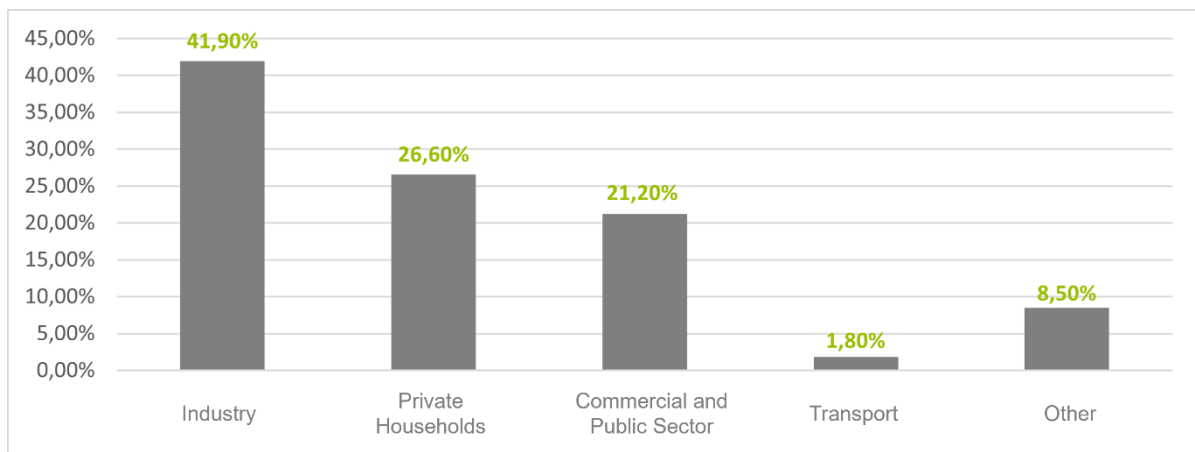
Das Kapitel Relevanz von Nachhaltigkeit für die Industrie stellt den Kontext der Industrie in Bezug auf den Klimawandel dar. Ziel dieses Kapitels ist das Verständnis der strategischen Bedeutung von Nachhaltigkeit für die Industrie und der Bedeutung der Industrie in Bezug zum Klimawandel.

#### 2.1.1 Industrie im Kontext des Klimawandels

Die Industrie ist ein Haupt-Energieverbraucher in Deutschland und leistet einen großen Beitrag zum Klimawandel. Dies liegt nicht zuletzt am hohen Energieverbrauch der Produktion (vgl. Abele. 2011, S. 21). Nach Angaben des Online-Portals Statista, lag der Stromverbrauch der Industrie im Jahr 2021 bei 44% des deutschen Gesamtstromverbrauchs. Verglichen zum Vorjahr 2020 wurde lediglich eine Einsparung von 1% gemessen (vgl. Statista. 2023).

Weltweit liegt der Anteil am Gesamtstromverbrauch durch den industriellen Wirtschaftssektor ähnlich hoch, wie der Bericht der International Energy Agency aus dem Jahr 2021 zeigt. Demnach wurde der weltweite Stromverbrauch 2021 durch die Industrie mit 41,9% am weltweiten Gesamtstromverbrauch angegeben. Damit ist die Industrie im Vergleich der größte Stromverbraucher unter den in Abbildung 1 verglichenen Wirtschaftssektoren.

**Abbildung 1:** Anteil der Industrie am weltweiten Stromverbrauch



Quelle: Eigenerstellung mit Daten aus International Energy Agency. 2021, S. 41

Obwohl in der Industrieforschung in den letzten Jahren viele neue Konzepte und Lösungsansätze zur Reduktion des Energieverbrauchs, des Ressourcenverbrauchs und zur Reduzierung weiterer negativer Umweltauswirkungen der Produktion entwickelt wurden, ist der Einfluss der Industrie auf den Klimawandel der größte unter den Wirtschaftssektoren. Mit Konzepten wie dezentralisierten Produktionssystemen (englisch: Distributed Manufacturing Systems, DMS), energieeffizienter Fabrikplanung, urbane verbrauchernahe Fabriken und Circular Economy (deutsch: Kreislaufwirtschaft, CE) soll der Beitrag der Industrie zum Klimawandel und der Umweltbeeinträchtigung minimiert werden (vgl. Korhonen et al. 2018, S. 37; Müller et al. 2013, S. 1–2; Rauch et al. 2015, S. 545; Sajadieh et al. 2022, S. 1). Die Restrukturierung der Produktion nach diesen neuen Konzepten bietet eine langfristige Perspektive für die nachhaltige Produktion. Aktuelle Fabrikanlagen und industrielle Prozesse müssen jedoch ebenfalls nachhaltiger werden. Um dies zu erreichen, bestehen große Erwartungen gegenüber dem Einsatz digitaler Technologien in der Industrie (vgl. Facchini et al. 2022, S. 1705).

### 2.1.2 Abkommen zum Klimawandel

Pro Jahr werden durch industrielle Prozesse, der Verbrennung von fossilen Brennstoffen und durch die agrikulturnelle Nutzung von Land, durchschnittlich 43,2 Giga-Tonnen CO<sub>2</sub> ausgestoßen. Dies entspricht einer Gesamtmenge von 1.337 Tonnen pro Sekunde. Wird diese Emissionsrate angenommen, so bleiben uns nach heutigem Stand (Juni 2023) knapp sechs Jahre, bis wir das 1,5°C Ziel für die globale Temperaturerhöhung überschritten haben. Bei einer Nutzung des 2°C Ziels wären es immerhin noch 23 Jahre (vgl. Mercator Research Institution on Global Commons and Climate Change 2023). Es wird von einer konstanten Ausstoßrate, wie oben angegeben, ausgegangen. Das Mercator Research Institut betreibt einen Online Carbon Clock Timer der uns die verbleibende Zeit anzeigt, bis wir das 1,5 und das 2,0°C Ziel überschritten haben ([Link zur Carbon Clock<sup>1</sup>](#)). Auch andere Institutionen bieten Timer an, welche die uns verbleibende Zeit berechnen, um den Klimawandel rechtzeitig zu stoppen. Die Angaben der verschiedenen

<sup>1</sup> Mercator Research Institution on Global Commons and Climate Change. 14.06.2023

---

Institutionen unterscheiden sich leicht, sind aber ähnlich (Mercator Research Institution on Global Commons and Climate Change 2023; The Guardian 2023). Eine aktuelle Forschung zum weltweiten Kohlenstoffzyklus, hat eine detaillierte Szenarioanalyse auf Basis der Emissionsraten der letzten Jahre durchgeführt und gibt für drei Szenarien ähnliche Zeitspannen an. In den Analysen wird eine Wahrscheinlichkeit von 50% angenommen, dass die Grenzwerte des Pariser Abkommens eingehalten werden. Dabei hat die Weltgemeinschaft, bei der aktuellen Emissionsrate (Stand 2022), noch neun Jahre für das 1,5°C Ziel und 30 Jahre für das 2,0°C Ziel (vgl. Friedlingstein et al. 2022, S. 4814).

Neun Jahre, um den Beitrag der Industrie zum Klimawandel zu minimieren ist wenig. Die Dringlichkeit der Minderung des weltweiten CO<sub>2</sub> Ausstoßes und der staatlichen Regulierung war unter Wissenschaftlern schon früh bekannt. Im Kyoto Protokoll von 1997 einigten sich erstmals Staaten der United Nations (deutsch: Vereinigte Nationen, UN) auf die Festlegung verbindlicher Klimaziele. Dieses Protokoll führte zu einer deutlichen Reduktion der Emissionen. In Kyoto in Japan wurde festgelegt, dass sich die Industriestaaten an die Reduktion von sechs Treibhausgasen um mindestens 5% zum Niveau von 1990 binden (vgl. Sekretariat der Klimarahmenkonvention. 1998, S. 4). Nach der Abrechnung der ersten Kyoto-Protokoll-Verpflichtungsperiode (2008-2012), hatte Deutschland seine GHG- Emissionen (Greenhouse Gas, deutsch: Treibhausgas) um durchschnittlich 23,6 Prozent gesenkt, welches die eigentliche Zielsetzung sogar übertraf, denn diese lag lediglich bei 21 Prozent (vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2023).

Am 4. November 2016 trat das Pariser Klimaschutzabkommen in Kraft, welches das erste globale Abkommen zum Klimaschutz bildet. 197 Staaten einigten sich auf das Abkommen. Mittlerweile ist das Abkommen weltweit von 180 Staaten ratifiziert (vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2023).

Die drei wichtigsten Ziele des Pariser Abkommens sind, insbesondere in Bezug zum globalen Temperaturanstieg, heute weit verbreitet und werden (wie auch in der vorangegangenen Analyse) oftmals zur Berechnung der verbleibenden Zeit für die Nachhaltigkeitstransformation genutzt. Die Staaten einigten sich auf eine Begrenzung des globalen durchschnittlichen Temperaturanstiegs von maximal 2°C in Vergleich zur vorindustriellen Zeit. Wenn möglich soll das 1,5°C Ziel eingehalten werden. Neben der Beschränkung des globalen Temperaturanstiegs wurde beschlossen, dass Finanzmittelflüsse in Einklang mit Klimazielen stehen sollen und die Anpassung der Staaten an den Klimawandel vorangetrieben werden muss (vgl. Umweltbundesamt. 2021; Watjer 2023).

## 2.2 Nachhaltigkeitsbegriff

Nachfolgend werden die wichtigsten Definitionen des Begriffs der Nachhaltigkeit, die Entwicklung des Begriffs und die wichtigsten Standardwerke im Bezug zur Nachhaltigkeit untersucht. Analysiert wird, welche Nachhaltigkeitsdefinition und welche Nachhaltigkeitsdimensionen insbesondere für die Industrie von großer Bedeutung sind. Ein grundlegendes Verständnis der Entwicklung der Nachhaltigkeitsforschung und der verschiedenen Begriffsabwandlungen im Laufe der Zeit bildet die Grundlage, um die Nachhaltigkeits-erreichung zu systematisieren.

---

## 2.2.1 Nachhaltigkeitsdefinition

Nachhaltigkeit ist keinesfalls ein neues Konzept. Den Gedanken von Nachhaltigkeit gibt es seit dem siebzehnten Jahrhundert (vgl. Huss und Gadow. 2012, S. 27). Über viele Jahre hinweg wurde der Nachhaltigkeitsbegriff, der ursprünglich aus der Forstwirtschaft stammt, entwickelt (vgl. Elkington. 1998, S. 19; Porter und van der Linde. 1995; United Nations 2023; United Nations. 1987, S. 15–16). Im Jahr 1987 wurde die Nachhaltigkeit von den Vereinten Nationen (englisch: United Nations) als eines der wichtigsten Themen der industriellen und gesellschaftlichen Zukunft identifiziert. Das wohl prominenteste theoretische Fundament ist der Bericht der Brundtland-Kommission. Ein Bericht der UN, der auch unter dem Namen Our Common Future bekannt ist. Dieser wird in der einschlägigen Literatur immer wieder zitiert. Der Bericht führt die weitverbreitete dreigeteilte Definition von Nachhaltigkeit ein.

Es wird zwischen der ökologischen, der ökonomischen und der sozialen Nachhaltigkeit unterschieden. Der Bericht betont, dass alle drei Dimensionen eine gleichwertige Bedeutung haben (vgl. United Nations. 1987, S. 15–16). Die Notwendigkeit der nachhaltigen Entwicklung ganzer Staaten zur Einhaltung der Planetaren Grenzen führt 1992 zur Agenda 21. In dieser Agenda wird festgehalten, dass die Nachhaltigkeitsentwicklung der Mitgliedstaaten von nun an eine Vorrangstellung bei den Tagungen der UN zugewiesen bekommt (vgl. United Nations. 1992, S. 3). Auch wenn in diesem Tagungsband bereits erste Ziele der nachhaltigen Entwicklung vorhanden sind, werden die 2015 geschaffenen nachhaltigen Entwicklungsziele der UN (englisch: Sustainable Development Goal, SDG) in der Literatur als Meilenstein für die Definition von qualitativen und quantitativen Zielen für die nachhaltige Entwicklung der Mitgliedstaaten definiert. Das Rahmenwerk der SDGs ist das umfangreichste Nachhaltigkeitszielsystem (United Nations 2023). In dieser Arbeit werden die SDGs in Kapitel 2.3.4 näher betrachtet.

Mit dem steigenden Druck der Öffentlichkeit, aber auch der Gesellschaft gegenüber Unternehmen, Nachhaltigkeit zu steuern und zu überwachen, kamen weitere Konzepte auf. Die dreigeteilte Nachhaltigkeit aus dem Brundtland-Bericht, wurde 1998 für das Management von Unternehmen angepasst (vgl. Elkington. 1998, S. 18). Die Arbeit von Elkington mit dem Titel The Triple Bottom Line ( TBL) aus dem Jahr 1998 wird immer wieder zitiert. Die Arbeit beschreibt, dass die ökonomische Dimension der Nachhaltigkeit genutzt werden muss, um Langzeitindikatoren für Nachhaltigkeit zu ermitteln und Nachhaltigkeit im Unternehmen langfristig zu sichern. Bei der Umweltperspektive steht im Vordergrund, wie Unternehmen ihre umweltbezogene Leistung (nachfolgend: Umweltleistung) verbessern. Der Fokus ist auf die Erhebung von quantifizierbaren und nachvollziehbaren Daten zur Umweltleistung der Unternehmen gelegt. Die soziale Dimension der Nachhaltigkeit misst Faktoren, welche die Einflüsse des Unternehmens auf das soziale Umfeld innerhalb des Unternehmens abbilden (vgl. Elkington. 1998, S. 19). Auch die Norm DIN EN ISO 14001, die im Folgenden betrachtet wird, verwendet den Begriff Umweltleistung (vgl. DIN EN ISO 14001:2015, S. 2).

Der Mechanismus der nachhaltigen Entwicklung von Produkten induziert einen Wettbewerbsvorteil in produzierenden Unternehmen. Vor allem die Erhöhung der Ressourceneffizienz steht im Fokus der frühen Nachhaltigkeitsdebatte in den produzierenden Unternehmen. Dass ökologische Verbesserungen auch wirtschaftliche Vorteile bringen, rückt die Nachhaltigkeit in den Mittelpunkt der Strategieentwicklungen und des Managements in Unternehmen (vgl. Porter und van der Linde. 1995).

---

Die Literaturrecherche zeigt das Unternehmen, die Nachhaltigkeit entwickeln wollen, zunächst die aktuellen wirtschaftlichen Treiber für Nachhaltigkeit verstehen müssen, um bei der nachhaltigen Entwicklung ihre Wettbewerbsfähigkeit zu wahren. Diese Treiber sind beispielsweise Kostenreduktion, Umsatzerhöhung, Risikoreduktion, Reputationserhaltung, Unternehmenswert, Attraktivität als Arbeitgeber und Innovationsfähigkeit. Um die Stellhebel und Startpunkte eines Unternehmens für eine Nachhaltigkeitstransformation zu identifizieren, bedarf es an Informationen und Daten. Ein aktives Management der Nachhaltigkeitsentwicklung ist ein fester Bestandteil der modernen Definition von Nachhaltigkeit (vgl. Schaltegger und Wagner. 2012, S. 19).

„*Meeting the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.*“ (United Nations 2023) Die Nachhaltigkeit hat immer einen Bezug zum aktuellen Geschäftsumfeld. Im Kapitel 2.2.2 wird ausführlicher gezeigt, dass Nachhaltigkeit auch durch Wirtschaftlichkeit gestützt wird. Nachhaltigkeit bedeutet: Heutige Anforderungen an das Unternehmen zu erfüllen und zur selben Zeit zukunftsorientiert zu handeln.

Aktuell stehen im Mittelpunkt der Nachhaltigkeitsdebatte vor allem die immer strengeren gesetzlichen Regelungen, Nachhaltigkeit in die unternehmerische Tätigkeit zu integrieren. Ein Beispiel ist die EU-Taxonomie, welche aktuell eine besonders hohe Bedeutung besitzt. Die EU-weit gültige Taxonomie ist ein System zur Klassifizierung von nachhaltigen Wirtschaftsaktivitäten (vgl. Bundesumweltministerium. 2022). Ein weiteres Beispiel ist das Gesetz über die unternehmerischen Sorgfaltspflichten in Lieferketten, welches durch eine genaue Definition von menschenrechtsbezogenen Risiken (vgl. Gesetz über die unternehmerischen Sorgfaltspflichten in Lieferketten, §2 Satz (2)) ein Risikomanagement für Unternehmen vorschreibt, die eine internationale Wertschöpfungskette betreiben. Das Risikomanagement verhindert, dass die im Gesetz definierten Menschenrechtsrisiken in der Lieferkette auftreten. Zunächst gilt das Gesetz nur für Unternehmen mit Sitz in Deutschland und mindestens 3 000 Beschäftigten. Dieser Schwellwert wird jedoch sukzessive gesenkt (vgl. Gesetz über die unternehmerischen Sorgfaltspflichten in Lieferketten, §1 Satz (1)).

### **2.2.2 Nachhaltigkeitsdimensionen**

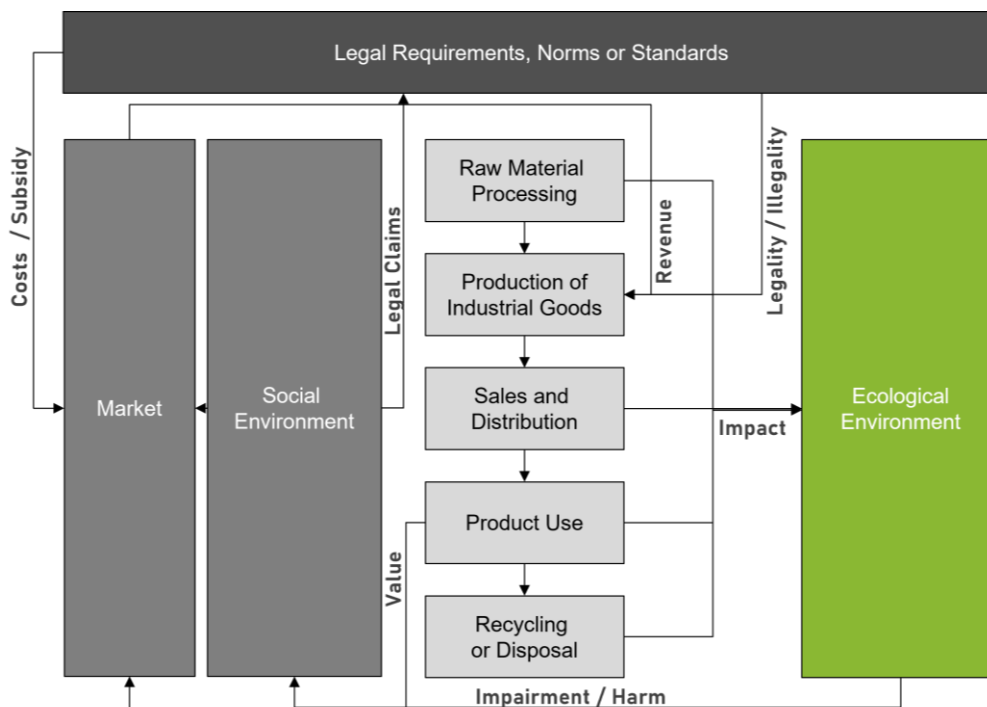
Im vorherigen Kapitel wurde erläutert, wie sich die Nachhaltigkeitsdefinition mit der Zeit entwickelt hat. Die Dimensionen der Nachhaltigkeit, die insbesondere für industrielle Unternehmen wichtig sind, werden nachfolgend näher betrachtet. „*Security can only be universal, (...) it must be (...) ecological, economical, and social.*“ (United Nations. 1987, S. 199) Diese drei Dimensionen der ökologischen Nachhaltigkeit, der ökonomischen Nachhaltigkeit und der sozialen Nachhaltigkeit sind bis heute die am häufigsten genutzten Dimensionen. Auch in der Industrie ist die Nutzung dieser Dreiteilung führend (vgl. Desai und Mital. 2021, S. 1).

Die ökologische Dimension stellt die Beziehung zwischen der Nutzung und der Erneuerung von natürlichen Ressourcen dar. Für die Industrie bedeutet dies, eine Nutzung von Ressourcen ohne Treibhausgas Emissionen oder anderen umweltschädigenden Stoffen zu erreichen. Diese Dimension wird häufig mit der Circular Economy verbunden, einem Konzept, für das es in der Industrie viele Anwendungsfälle gibt. In der Industrie ist die soziale Dimension eng mit dem Personal Management (englisch: Human Resources, HR) verknüpft. Die ökonomische Dimension ist in der Industrie mit der Wirtschaftlichkeit neuer

nachhaltiger Geschäftsmodelle und dem Ausbalancieren von nachhaltigen Investitionen und den erwarteten Erträgen verbunden (vgl. Contini und Peruzzini. 2022, S. 1). Die drei Dimensionen aus dem Konzept der TBL werden heute in den meisten Arbeiten als Ausgangspunkt betrachtet. Ein großes technisches Feld, dass die Dreiteilung bereits in Richtlinien verwendet, findet sich bspw. in der nachhaltigen Produktentwicklung (Su. 2020, S. 3).

In Abbildung 2 ist graphisch die Beziehung von Markt, sozialem Umfeld und Umwelt dargestellt, in der sich die Industrie befindet. In der Abbildung ist zu sehen, dass die industrielle Wertschöpfungskette in einem komplexen Zusammenhang steht. So haben alle Schritte der industriellen Wertschöpfungskette eine Auswirkung auf die Umwelt. Umweltschädigung steht wiederum in direktem Zusammenhang mit einer Beeinträchtigung oder Schädigung des sozialen Umfelds. Aus dieser Schädigung können Rechtsansprüche und Schadensersatz geltend gemacht werden, die den Erfolg aus dem Verkauf von Produkten mindern. Der Markt, der für die Höhe des erzielbaren Erfolgs maßgebend ist, wird durch gesetzliche Vorgaben reguliert. Über die indirekte Beziehung von Umwelt und Markt wird ersichtlich, dass die industrielle Wertschöpfungskette nur dann den Erfolg maximieren kann, wenn auch Nachhaltigkeit in die Ziel- und Steuerungssysteme aufgenommen wird.

**Abbildung 2:** Wechselwirkungen zwischen Industrie und Umwelt



Quelle: Eigenerstellung in Anlehnung an Müller et al. 2013, S. 3

Die Dreiteilung der TBL steht unter Kritik. Viele Forschende diskutieren, ob die Definition die komplexen Beziehungen abbilden kann, in der sich die industrielle Produktion befindet. Dies wird insbesondere vor dem Hintergrund der Begriffsentwicklung von Nachhaltigkeit zur nachhaltigen Entwicklung diskutiert (Ruggerio. 2021; United Nations 2023). Aktuelle wissenschaftliche Artikel fügen der häufig genutzten

---

dreigeteilten Nachhaltigkeitsdefinition weitere Dimensionen hinzu. Diese sind beispielsweise die technologische und institutionelle Dimension (vgl. Verma et al. 2022, S. 1).

Der Begriff der nachhaltigen Entwicklung erlangt heute zunehmend an Bedeutung (vgl. Ruggerio. 2021, S. 9). Obwohl zum Thema Nachhaltigkeit bereits eine große Forschungsgrundlage existiert, wird die ökologische und wirtschaftliche Dimension der Nachhaltigkeit, gerade im technischen Umfeld, bisher am häufigsten untersucht (vgl. Korhonen et al. 2018, S. 38). In der jüngsten Literatur finden sich mehr Werke, die auch bei technischen Anwendungen, die Betrachtung der sozialen Dimension durchführen. In der Literatur wird gefordert, dass die verbreitete Dreiteilung der Nachhaltigkeit, gerade in Anbetracht der Begriffsentwicklung, angepasst wird. Nachhaltige Entwicklung verfügt, im Gegensatz zur TBL-Dimensionierung, über zusätzliche Dimensionen. Diese zusätzlichen Dimensionen sind die politische Dimension und die Zeit-Dimension. Außerdem muss eine intergenerationale und intragenerationale Betrachtung eingeführt werden (vgl. Ruggerio. 2021, S. 9; United Nations 2023).

Folgend soll weiterhin die dreigeteilte Nachhaltigkeitsdefinition der TBL verwendet werden, da diese in den relevanten wissenschaftlichen Artikeln zu Nachhaltigkeitszielen und -zielsystemen, gerade unter Berücksichtigung der Digitalisierung, am häufigsten verwendet wird (vgl. Ayabaca und Vila. 2020, S. 5; Fuerter et al. 2022, S. 4; Verma et al. 2022, S. 1).

Die Integration von Nachhaltigkeit in der Industrie muss ganzheitlich geschehen, da Nachhaltigkeit zum einen eine strategische Bedeutung für die Unternehmen hat und gleichzeitig durch Technologien auf der operativen Ebene umgesetzt wird. Nachhaltigkeit muss auf allen hierarchischen Ebenen im Unternehmen implementiert werden. Die Forschung weist darauf hin, die strategische, die taktische und die operative Integration bei der Implementierung zu unterscheiden (vgl. John und Narayanamurthy. 2015, S. 19; Ruggerio. 2021, S. 9).

## **2.3 Systematisierung und Bewertung von Nachhaltigkeit**

Dieses Kapitel erklärt, was ein System ist, wie es im Unternehmen eingebettet ist und welche Wechselwirkungen und Komponenten ein System ausmachen. Die Bedeutung von Managementsystemen für die Steuerung der nachhaltigen Transformation wird verdeutlicht. Zu diesem Zweck werden die wichtigsten Normen zitiert, die in der Industrie oftmals den Grundstein von unternehmensspezifischen Managementsystemen bilden und somit eine wichtige Position besitzen.

### **2.3.1 Umweltmanagementsysteme**

Systematisierung von Nachhaltigkeit im Unternehmen setzt voraus, dass durch die Entwicklung und Integration eines Systems Nachhaltigkeit erreicht wird. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Systematisierung des Einsatzes digitaler Technologien zur Nachhaltigkeitserreichung. Nachfolgend wird gezeigt, dass Nachhaltigkeit durch eine Reihe von betrieblichen Prozessen erzielt wird. Diese Prozesse bilden ein beschreibbares System.

Standards zu Qualitätsmanagementsystemen, sind in der Industrie bekannt und dienen oft als Grundlage für die Entwicklung von unternehmensspezifischen Managementsystemen. Die internationale Norm DIN

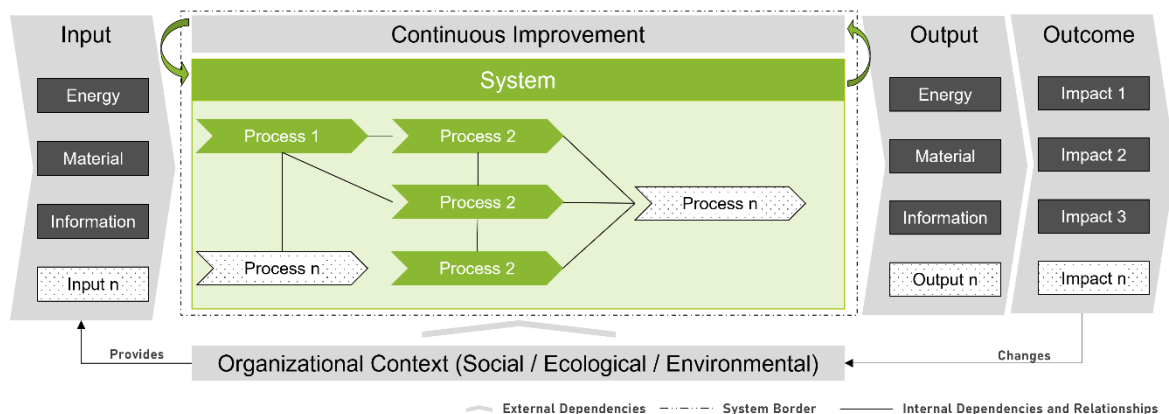


EN ISO 9000 beschreibt, dass Qualitätsmanagementsysteme die Organisationen in denen diese eingesetzt werden, dazu befähigen, Herausforderungen zu begegnen die durch das Umfeld verursacht werden und sich von vergangenen Jahrzehnten deutlich unterscheiden (vgl. DIN EN ISO 9000:2015, S. 9). Diese für die Qualitätserreichung genutzten Systeme, werden in der Praxis bereits seit längerer Zeit eingesetzt und in komplexen Wertschöpfungsnetzwerken wie der Automobilindustrie von Lieferanten gefordert.

Werden Tätigkeiten zusammenhängend und als Prozesse in einem System gesteuert, so werden Ergebnisse beständig, wirksam und effizient erreicht (vgl. DIN EN ISO 9000:2015, S. 17). Dies gilt nicht nur für die Qualitäts-, sondern auch für die Nachhaltigkeitstransformation. Ein Managementsystem enthält die Tätigkeiten der Organisation, die zur Ermittlung von Zielen sowie der Bereitstellung von Prozessen und Ressourcen um diese Ziele zu erreichen, durchgeführt werden (vgl. DIN EN ISO 9000:2015, S. 10). Die Norm DIN EN ISO 14001 fokussiert sich auf ein prozessuales Umweltmanagement durch Kennzahlen. Diese machen den Output des Systems, die Umweltleistung eines Unternehmens, messbar (vgl. DIN EN ISO 14001:2015, S. 4).

Managementsysteme steuern die Erreichung relevanter Ergebnisse für die interessierten Parteien (Stakeholder) (vgl. DIN EN ISO 9000:2015, S. 11). Als Leistung eines Managementsystems wird ein messbares Ergebnis bezeichnet. Dieses kann qualitativ oder quantitativ sein (vgl. DIN EN ISO 9000:2015, S. 45). Die Ziele eines Managementsystems sind vielfältig. Ein zentrales Element ist die wirksame Steigerung der Effizienz mit der bestimmte, dem Zweck des Systems entsprechende, Ergebnisse erzielt werden. Für eine Steigerung der Effizienz wird das Verhältnis zwischen den Ergebnissen und eingesetzten Ressourcen optimiert (vgl. DIN EN ISO 9000:2015, S. 61).

**Abbildung 3: System, Umwelt und Prozesse**



Quelle: Eigenerstellung in Anlehnung an DIN EN ISO 9001:2015, S. 12–14; Portmann. 2018, S. 500

Das prozessorientierte Qualitätsmanagementsystem aus der Norm DIN EN ISO 9001 vereint das Planen-Durchführen-Prüfen-Handeln Modell (englisch: Plan-Do-Check-Act, PDCA) im Kern des Managementsystems. Für das Unternehmen bietet ein prozessorientierter Ansatz die Möglichkeit Prozesse zu planen und die kontinuierliche Verbesserung im Unternehmen umzusetzen. Das PDCA-Modell ermöglicht die Sicherstellung eines angemessenen Ressourceneinsatzes, sowie die Identifikation und Nutzung von Verbesserungspotenzialen (vgl. DIN EN ISO 9001:2015, S. 9). Prozesse strukturieren Aufgaben, die Eingaben in

---

Ergebnisse transformieren (vgl. DIN EN ISO 14001:2015, S. 3; DIN EN ISO 9000:2015, S. 23) Ein System ist immer in eine Umwelt eingebunden, die in Wechselwirkung mit dem System steht. Systeme funktionieren nur durch Ihre Elemente die, je nach Größe, oftmals auch als Subsysteme bezeichnet werden. Dennoch kann das Systemverhalten nicht vollständig erklärt werden, wenn lediglich das Zusammenwirken der einzelnen Komponenten betrachtet wird. Die Umwelt besitzt ebenfalls einen Einfluss auf das System (vgl. Portmann. 2018, S. 499).

Systeme sind durch Ihre Systemgrenzen definiert. Diese werden vom Betrachtenden gezogen. Die Analyse der Elemente eines Systems ermöglicht es Aussagen über das Systemverhalten zu treffen. Dies ist notwendig, um optimale Systemzustände bzw. Ergebnisse zu erreichen. Ein System kann eine ganze Stadt oder ein begrenzter Betrachtungsraum, wie eine Maschine oder ein Werk sein. Die Größe eines betrachteten Systems ist zweitrangig. Vorrangig ist das Verständnis von Systemen als komplexe Wechselwirkungen zwischen internen und externen Elementen (vgl. Portmann. 2018, S. 499–500).

Die Verknüpfung dieser Elemente wird Ausgangspunkt für die nachfolgenden Betrachtungen. Wie in Abbildung 3 zu erkennen, ist ein System ein Betrachtungsbereich, in dem mehrere in Wechselwirkung miteinander stehende Prozesse den System-Input zu Output transformieren. Das System folgt bestimmten Regeln und besitzt i. d. R. Abläufe, die für die Verbesserung des Systems und seiner Prozesse verantwortlich sind (vgl. DIN EN ISO 14001:2015, S. 46; DIN EN ISO 9001:2015, S. 49). Jeder Prozess transformiert einen Teil des Systeminputs oder den Output eines vorgelagerten Prozesses. Input und Output eines Systems sind i. d. R. Energie oder Material, wenn es sich um technische Systeme handelt. Aber auch Information ist ein Input oder Output, wie bei sozio-technologischen Systemen. Das System wird bei der Transformation durch die Umwelt beeinflusst. Diese wirkt auf den Transformationsprozess, aber auch auf die Inputfaktoren. Die Umwelt selbst, kann sich durch die Umweltwirkungen des Outputs eines Systems verändern.

### 2.3.2 Nachhaltigkeitszielsysteme

Wie beschrieben, ist es sinnvoll Nachhaltigkeit zu systematisieren, da dies zu Effizienzsteigerung, Transparenz und einer gezielten Steuerung von Nachhaltigkeitsprozessen führt. In industriellen Unternehmen werden Nachhaltigkeitssysteme zum Nachhaltigkeitsmanagement verwendet. Genutzt werden hier zum einen Normen zu Umwelt- und Umfeldmanagementsystemen (vgl. DIN EN ISO 26000:2021-04, S. 8; IWA 26:2017, S. V), andererseits werden stetig neue Konzepte entwickelt die von großer Bedeutung sind und in bestehende Systeme integriert werden müssen (United Nations 2023). Somit ist die Entwicklung von Nachhaltigkeitssystemen ein iterativer Prozess. Erst durch die dreigeteilte Definition der Nachhaltigkeit, auch TBL oder Three Pillars of Sustainability (deutsch: die drei Nachhaltigkeitssäulen) genannt, wurde Nachhaltigkeit mit Managementsystemen in Verbindung gebracht (vgl. Elkington. 1998, S. 21). Die vier wichtigsten Nachhaltigkeitsrahmenwerke sind in Tabelle 1 erklärt. Diese Zielsysteme werden untersucht, um ein Verständnis an die Anforderungen, sowie die Nachvollziehbarkeit, Messbarkeit und Integration von Nachhaltigkeit in Unternehmen zu erlangen (vgl. Ayabaca und Vila. 2020, S. 1–2). Einige weitere Systeme, die in der Literatur genannt werden, wurden in der Tabelle ergänzt.

Die Nachhaltigkeitszielsysteme sind als geschlossene Systeme aufgebaut, lassen sich aber verknüpfen. Die Internationale Organisation für Standardisierung gibt z. B. für die Norm ISO 26000 an, dass die Integration

---

des in der Norm vorgeschlagenen Systems zu den SDGs 1 bis 16 beiträgt (vgl. International Organization for Standardization. 2018). Die UN SDGs, werden in vielen wissenschaftlichen Artikeln referenziert und dienen in den meisten Nachhaltigkeitsmanagementsystemen und Umweltmanagementsystemen (UMS) als übergeordnetes Zielbild der nachhaltigen Transformation, und sind als solche omnipräsent. Die Entwicklung verschiedener Nachhaltigkeitsrahmenwerke dient vor allem der differenzierten Adressierung der verschiedenen Anforderungen sowie den verschiedenen Ebenen und Bereichen in Unternehmen, in denen die Nachhaltigkeit integriert werden soll.

**Tabelle 1:** Kurzvorstellung der für die Industrie relevanten Nachhaltigkeitsrahmenwerke

Name	Description
<b>UN Sustainable Development Goals</b>	<p>The sustainable development goals adopting the UN Agenda 2030 and formulating seventeen goals with specific sub goals each. The sustainable development goals define a sustainability framework for governments and companies. To achieve a sustainable development, the companies should aim to achieve the sustainable development goals that are related to the company's business practices (vgl. United Nations. 2017, S. 2–3).</p>
<b>Planetary Boundaries</b>	<p>„The Planetary Boundaries concept has emerged as a framework for articulating environmental limits, gaining traction as a basis for considering sustainability in business settings, government policy and international guidelines.“(Ryberg et al. 2018, S. 2) The framework defines quantitative boundaries rather than sustainability goals. The boundaries show the space in which the intervention with the Earth System is safe and does not lead to an increase risk for future generations (vgl. Ryberg et al. 2018, S. 3–4; Whiteman et al. 2013, S. 309).</p>
<b>International Standards:</b>  ISO 14001:2015 Environmental Management System / ISO 26000: 2010 Social Responsibility	<p>Balancing the ecological, social, and economic responsibility of a company is considered as an essential element of a company's business practice. This has led the organizations to develop a systematic approach to achieve sustainability by implementing environmental management systems. The international standard ISO 14001 defines the requirements of an environmental management system, helping companies to manage their sustainable development (vgl. DIN EN ISO 14001:2015, S. 14).</p> <p>The international standard ISO 2600 offers guidance to companies to identify and manage the impact of the company's business on the social environment. Therefore, it is also often addressed as Corporate Social Responsibility (CSR) standard. The standard can be implemented in any company regardless of its size or type. The international standard ISO 26000 helps companies to manage their social sustainable development (vgl. IWA 26:2017, S. 13).</p>
<b>Sustainability Balanced Scorecard</b>	<p>The Sustainability Balanced Scorecard is a sustainability management system, which aims on the integration of standalone satellite environmental management systems into existing management systems. It is a value driven approach for sustainability management through the integration of sustainability management into the often used and well-known concept of the Balanced Scorecard that was developed by Kaplan and Norton 1992. This integration aims towards the development of a holistic management system for steering (vgl. Figge et al. 2001, S. 1).</p>

Quelle: Eigenerstellung in Anlehnung an Ayabaca und Vila. 2020, S. 1–2

---

### 2.3.3 Zusammenhänge zwischen Nachhaltigkeitsrahmenwerken

Nachhaltigkeitsrahmenwerke haben verschiedene Ziele. Die Erhöhung der Fähigkeit zur Erreichung eines nachhaltigen ökologischen, ökonomischen und sozialen Einflusses auf das Unternehmensumfeld steht im Kern aller Nachhaltigkeitsrahmenwerke. Die UN SDGs werden in den meisten Rahmenwerken als übergeordnetes Zielbild betrachtet. Viele Studien nutzen die SDGs um anhand dieser, untergeordnete und teils industriespezifische Ziele abzuleiten (vgl. Verma et al. 2022, S. 4). In der Literatur wird eine solche Verknüpfung der SDGs mit industriespezifischen Standards und Managementsystemen gefordert. Huaccho Huatuco und Ball stellen zum Beispiel die Forderung, dass geeignete industriespezifische Systeme entwickelt werden müssen, welche die SDGs in die Sprache und Metriken der anwendenden Industrien übersetzt (vgl. Huaccho Huatuco und Ball. 2019, S. 361). Nicht selten wird der Bezug zu digitalen Technologien hergestellt, die maßgebend für die Erreichung der SDGs sind. Der offizielle Bericht der UN zu den SDGs gibt an, dass die nachhaltigen Entwicklungsziele von Staaten und Unternehmen genutzt werden sollen, um ein selbstbezogenes und reflektiertes Zielbild für die nachhaltige Entwicklung zu bilden (vgl. United Nations. 2017, S. 2–3). Managementsysteme helfen Unternehmen die SDGs systematisch zu erreichen. Hierzu werden Prozesse entwickelt und Optimierungsmethoden vorgeschlagen (vgl. TÜV SÜD. 2020, S. 2).

Die Norm DIN EN ISO 26000 und die Norm DIN EN ISO 14001 beschreiben die Anforderungen an solche Managementsysteme. Die Norm DIN EN ISO 26000 greift einige der SDGs auf und gibt einen systematischen Ansatz vor, wie Unternehmen diese Ziele erreichen können. Durch die Einführung eines Managementsystems für die CSR können Unternehmen ihren Beitrag zu den SDGs maximieren. Hierbei stehen im System der Norm DIN EN ISO 26000 die sozialen Ziele im Vordergrund (vgl. International Organization for Standardization 2023; International Organization for Standardization. 2018, S. 17). Ähnliches schreibt die Norm DIN EN ISO 14001, die sich auf den Beitrag von Unternehmen auf die Umwelt konzentriert. Die Norm DIN EN ISO 14001 trägt beispielsweise zur Erreichung des SDG 6 (sauberes Wasser und Sanitäreinrichtungen) oder SDG 13 (Maßnahmen zum Klimaschutz) bei (vgl. TÜV SÜD. 2020, S. 2).

Managementsysteme werden immer häufiger direkt mit übergeordneten Konzepten wie den SDGs verknüpft. Wie in Tabelle 1 gezeigt, gibt es Ansätze, die versuchen ganzheitliche Managementsysteme zu entwickeln, welche die alleinstehenden Satellitensysteme vereinen. Dabei bildet bspw. die Sustainability Balanced Scorecard, die in Kapitel 2.3.7 beschrieben wird, eine Orientierung zur Durchführung systematischer Managementaktivitäten, die eine effiziente und effektive Reduktion der Umweltbelastung erzielen (vgl. Figge et al. 2001, S. 9).

Das für die erfolgreiche Nachhaltigkeitstransformation Ziele definiert werden müssen, die über Staaten hinweg verbindlich festgelegt werden und eine systematische Transformation hin zu einer nachhaltigeren Wirtschaft bewirken, zeigt der Erfolg des Kyoto Abkommens und des Abkommens von Paris (s. Kapitel 2.1.2) bei denen sich die Mitgliedstaaten der United Nations verbindlich auf Klimaziele, insbesondere in Bezug auf den Klimawandel, festlegten. Das moderne Verständnis von Nachhaltigkeit ist jedoch multidimensional und umfasst neben der ökologischen Perspektive auch die ökonomische und soziale Dimension, wie das Kapitel 2.2.2 zeigt. Moderne Rahmenwerke für Nachhaltigkeitsziele sind aus diesem Grund umfangreicher und beschreiben nicht nur ökologische Ziele. Die in der Tabelle 1 aufgeführten Nachhaltigkeitsrahmenwerke werden nachfolgend einzeln vorgestellt.

---

### 2.3.4 Sustainable Development Goals

Die Sustainable Development Goals, die von den UN als Teil der Agenda 2030 eingeführt wurden, bilden heute eines der wichtigsten und bekanntesten Rahmenwerke für die Nachhaltigkeitstransformation in der Wirtschaft. Dabei wurden von den UN insgesamt 17 Entwicklungsziele definiert. Diese Ziele sind wiederum untergliedert in granulare Targets (Sub-Ziele). Insgesamt stellt das Rahmenwerk der Sustainable Development Goals 169 Targets bereit, mit denen die nachhaltige Entwicklung der Unternehmen und ganzer Staaten gemessen werden kann. So soll nachhaltiges Wirtschaftswachstum, soziale Inklusion und Umweltschutz gesichert werden (vgl. Hatayama. 2022, S. 1).

In der Abbildung 4 können die übergeordneten 17 Ziele der SDGs betrachtet werden. Die Icons in der Abbildung sind die standardisierten Icons für das jeweilige SDG. In Tabelle 2 sind zum SDG 9 Industrie, Innovation und Infrastruktur exemplarisch die Targets zu sehen. Hier fällt auf, dass auch die Einheit, in der das Ziel gemessen werden soll, angegeben ist. Diese Ziele können von Unternehmen als Kennzahlen für die strategische Steuerung genutzt werden (vgl. Verma et al. 2022, S. 4).

Anders als bei anderen Nachhaltigkeitsrahmenwerken, können nicht alle Nachhaltigkeitsziele der SDGs für jede Industrie gleich gut genutzt werden. Bei einer Nachhaltigkeitsbewertung eines Werks oder eines Unternehmens muss zuerst analysiert werden, welche Ziele für das Unternehmen besonders wichtig sind oder welche Ziele vom Unternehmen besonders beeinflusst werden. Hierbei spielen auch geographische Faktoren, wie das Land oder der Standort, eine Rolle. Eine Forschung zur Adaption der SDGs in der Metallindustrie zeigt, dass insbesondere die SDGs 8, 3, und 12 für die Metallindustrie wichtig sind. Die SDGs 14, 2, und 1 besitzen für die Metallindustrie in den Ergebnissen der Studie die geringste Bedeutung (vgl. Hatayama. 2022, S. 1).

In der Abbildung 4 sind für das SDG 9 die zugehörigen Sub-Ziele angegeben. Nicht alle Sub-Ziele sind für jedes Unternehmen relevant. Dies gilt für viele der insgesamt 169 Sub-Ziele innerhalb des Rahmenwerks der SDGs. Dennoch sind einige der Ziele aus der Abbildung 4 geeignet, um die strategische Nachhaltigkeitsentwicklung in Industrieunternehmen zu messen. Sub-Ziele die direkt in der Industrie genutzt werden können, sind bspw.: Manufacturing Value-Added as a Proportion of GDP [%]; Manufacturing Employment as a Proportion of Total Employment [%]; Carbon Dioxide Emissions per Unit of GDP [kg of CO<sub>2</sub> equivalent per constant] oder Carbon Dioxide Emissions per Unit of Manufacturing Value-Added [kg of CO<sub>2</sub> equivalent per constant 2015].

Je nach Industrie muss eine Vorauswahl der SDGs getroffen werden, welche für das Unternehmen oder die betrachtete Industrie am wichtigsten sind. Eine strategische Zielauswahl ist bei einem systematischen Vorgehen bei der Nachhaltigkeitstransformation unerlässlich. Über alle Branchen und Industrien hinweg, werden die SDGs 13 Klimawandel, 8 Arbeits- und Wirtschaftswachstum und 3 Gesundheit und Wohlbefinden von Unternehmen am wichtigsten eingeschätzt. Die SDGs 15 Leben auf der Erde, 2 Kein Hunger und 14 Leben unter Wasser werden insgesamt von Unternehmen am unwichtigsten eingeschätzt. Dies zeigt, dass nicht alle SDGs in gleichem Maße für Unternehmen von Bedeutung sind (vgl. Blasco et al. 2018, S. 6). Die Unternehmen Unilever und McDonald's beispielweise, fokussierten sich zunächst auf das SDG 2 und 8 sowie 12 und 13, und richten sich strategisch an diesen aus (vgl. Huaccho Huatuco und Ball. 2019, S. 358). Die Priorisierung der SDGs nimmt jedes Unternehmen selbstständig vor. Für eine Nutzung der SDGs zur Nachhaltigkeitssteuerung müssen diese in eine einheitliche, je nach Industrie ausgewählte,

industriespezifische verständliche Art und Weise übersetzt, und mit geeigneten Kennzahlen unterlegt werden (vgl. Huaccho Huatuco und Ball. 2019, S. 361).

In allen Bereichen der gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Entwicklung wurde in den letzten Jahrzehnten großer Fortschritt erreicht. Bezugnehmend auf die Erreichung der SDGs, geht der Wandel jedoch zu langsam. Zeit wird daher als wichtigster Faktor bei der Nachhaltigkeitstransformation angesehen (vgl. United Nations. 2017, S. 3).

**Abbildung 4:** Die 17 SDGs mit den standardisierten Icons der UN




Quelle: Eigenerstellung in Anlehnung an Asian Development Bank. 2022

Die SDGs sind auf der strategischen Ebene, nicht nur wegen ihrer Bekanntheit, sondern auch wegen der großen Forschungsgrundlage zur Verknüpfung der SDGs mit anderen Konzepten, besonders für strategische Nachhaltigkeitsentscheidungen geeignet. Im Anhang 4 ist dargestellt, wie die SDGs den Dimensionen der dreigeteilten Nachhaltigkeitsdefinition (ökologisch, ökonomisch und sozial) zugeordnet werden.

Durch die hohe mediale Präsenz und der interdisziplinären Anwendung der SDGs in Politik, Wirtschaft und Forschung, gibt es bereits Ansätze, gängige Standards zu Umweltmanagementsystemen wie die Anforderungen der DIN EN ISO 14001 auf die SDGs auszurichten. Der TÜV SÜD bezeichnet UMS als Stütze für die Umsetzung der SDGs in den Unternehmen (vgl. TÜV SÜD. 2020). Die SDGs werden in nahezu jeder neueren Literatur zur Nachhaltigkeit erwähnt und sind insbesondere für die strategische Nachhaltigkeitssteuerung in Unternehmen geeignet.

**Tabelle 2:** Targets für das SDG 9 Industrie, Innovation und Infrastruktur

	Passenger Volume, by Road Transport [p–km million]
	Freight Volume, by Road Transport [t–km million]
	Passenger Volume, by Rail Transport [p–km million]
	Freight Volume, by Rail Transport [t–km million]
	Manufacturing Value-Added as a Proportion of GDP [%]
	Manufacturing Value-Added per Capita [at constant 2015 \$]
	Manufacturing Employment as a Proportion of Total Employment [%]
	Carbon Dioxide Emissions, Per Unit of GDP [kg of CO <sub>2</sub> equivalent per constant]
	Carbon Dioxide Emissions, Per Unit of Manufacturing Value-Added [kg of CO <sub>2</sub> equivalent per constant 2015 \$]
	Research and Development Expenditure as a Proportion of GDP [%]
	Researchers [Full-Time Equivalent] [per million inhabitants]
	Total Official International Support to Infrastructure [constant 2020 \$ million]
	Proportion of Medium and High-Tech Industry Value Added in Total Value Added [%]
	Proportion of Population Covered by 2G Mobile Networks [%]
	Proportion of Population Covered by 3G Mobile Networks [%]
Proportion of Population Covered by LTE Mobile Networks [%]	

Quelle: Eigenerstellung in Anlehnung an Asian Development Bank. 2022

### 2.3.5 Planetare Grenzen

Ein weiteres weit verbreitetes Konzept, welches aggregierte und vor allem umweltbezogene Kennzahlen liefert, ist das Konzept der Planetaren Grenzen (englisch: Planetary Boundaries, PB). Das PB-Konzept wurde erstmals 2009 eingeführt. Ziel des Konzepts ist die Identifikation der Prozesse, die die Stabilität und Resilienz des Systems Erde gewährleisten. Für diese Prozesse wurden mit dem Konzept der Planetaren Grenzen, quantitative Grenzwerte geschaffen, die den Bereich definieren, in dem wir sicher mit dem System Erde interagieren können. Der Fokus des PB-Rahmenwerks liegt folglich stark auf der ökologischen Dimension der Nachhaltigkeit. Überschreiten wir die Grenzen, so ist mit großem Schaden für kommende Generationen zu rechnen. Heute zählt das Rahmenwerk der PB neben den SDGs zu den bekanntesten Nachhaltigkeitskonzepten (vgl. Steffen et al. 2015, S. 736; Stockholm Resilience Center. 2023).

Gerade für die produzierende Industrie stellt die nachhaltige Interaktion und Nutzung des Systems Erde und dessen Ressourcen eine Notwendigkeit dar (vgl. Gladwin et al. 1995, 874). In industriellen Unternehmen werden bis dato, auch wenn dem Thema stetig steigende Aufmerksamkeit zukommt, nur selten Daten aus dem Unternehmen genutzt, um die Auswirkungen von Geschäftsprozessen und betrieblichen Entscheidungen auf Nachhaltigkeit in der makroskopischen Ebene zu bewerten. Hier ist ein Wandel jedoch zwingend notwendig. Das Management muss Geschäftsprozesse und Entscheidungen mit makroökologischen Zielen bzw. Grenzwerten wie den Planetaren Grenzen verlinken (vgl. Whiteman et al. 2013, S. 307–308).



---

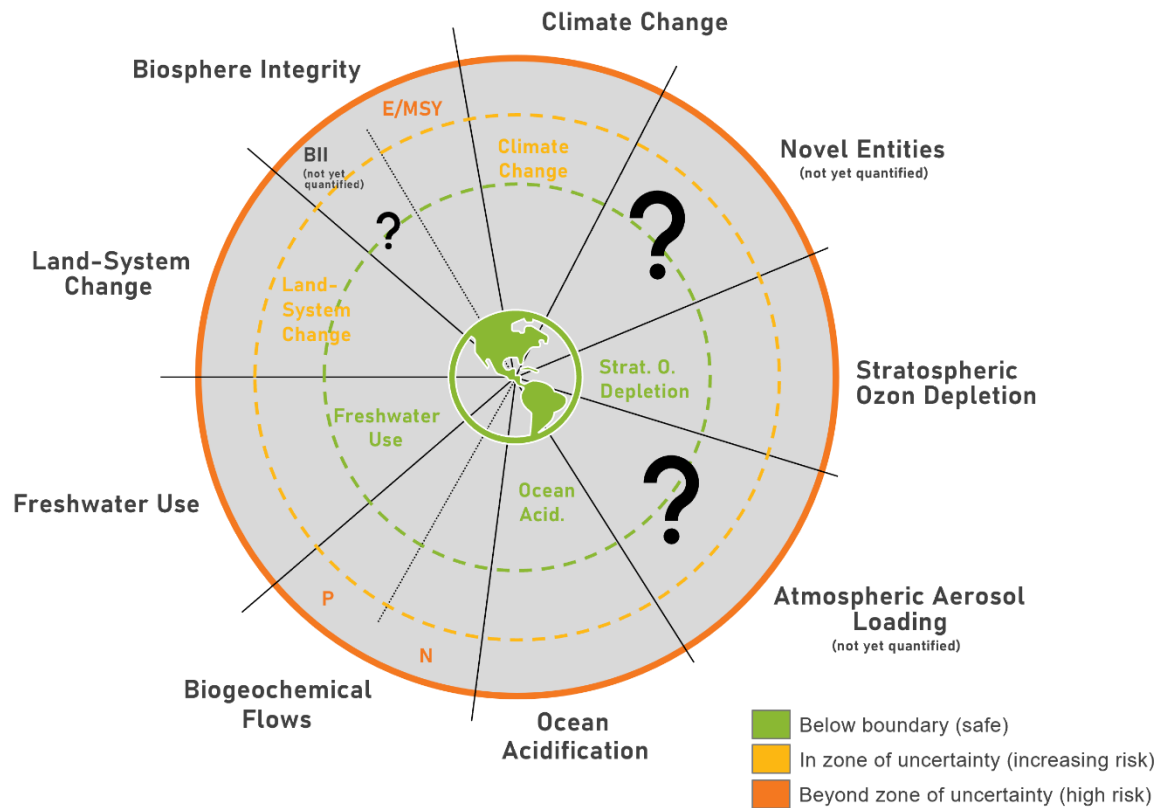
Wie in Abbildung 5 zu sehen, ist der Klimawandel nur eine der insgesamt neun Planetaren Grenzen. In der Darstellung des Konzepts der Planetaren Grenzen des Stockholm Resilience Center ist zu erkennen, dass der Klimawandel aktuell zu den Planetaren Grenzen gehört, die ein steigendes Risiko für das System Erde bilden. Die Planetaren Grenzen Ozonverlust in der Stratosphäre, Aerosolgehalt der Atmosphäre, Versauerung der Meere und Süßwassernutzung sind nach Angaben des Stockholm Resilience Center innerhalb der Grenzwerte, die keine großen Risiken für die Stabilität des Systems Erde darstellen. Die Planetaren Grenzen der biogeochemischen Flüsse (Phosphor, Stickstoff) und Intaktheit der Biosphäre (Funktionale und genetische Vielfalt) sowie der Landnutzungswandel stellen aktuell die größten Bedrohungen für das System Erde dar. Insbesondere die genetische Vielfalt ist stark bedroht (vgl. Bundesumweltministerium. 2021; Stockholm Resilience Center. 2023).

Die Industrie und auch andere Gewerbe müssen deshalb die kritischen planetaren Grenzwerte in die betrieblichen Entscheidungen überführen (vgl. Whiteman et al. 2013, S. 309). Immer mehr Unternehmen führen Umweltkennzahlen in das betriebliche Reporting ein und nutzen diese Kennzahlen bei betrieblichen Entscheidungen (vgl. Ryberg et al. 2018, S. 3). Dies deutet auf ein bereits angestoßenes Umdenken der Unternehmen hin. Da es sich bei dem Konzept der planetaren Grenzen um ein Konzept mit quantifizierten Kennzahlen handelt, gibt es in der industriellen Forschung viele Ansätze die PB-Grenzen, in gängige Methoden der Nachhaltigkeitsbewertung wie der Lebenszyklusanalyse, zu übernehmen (vgl. Ryberg et al. 2018, S. 27).

In der industriellen Forschung, werden immer mehr Arbeiten veröffentlicht, die übergeordnete Rahmenwerke in firmen- und prozessspezifische Kennzahlen überführen. Teile der Forschung widmen sich der Betrachtung spezifischer Industriezweige wie der Nahrungsmittelindustrie und bewerten, innerhalb welcher Szenarien der nachhaltigen Transformation die PB in dem betrachteten Industriezweig eingehalten werden können (vgl. Conijn et al. 2018, S. 1).

Die Nutzung der PB zur Ableitung von Nachhaltigkeitszielen im Unternehmen ist nicht ungewöhnlich. Im Gegensatz zu vielen Targets der SDGs sind die PB quantifiziert und eignen sich daher besonders gut, um operative Kennzahlen abzuleiten. Das Framework der PB wird in der Industrieforschung immer häufiger, in Bezug auf die klassische dreigeteilte Nachhaltigkeitsdefinition, verwendet.

Abbildung 5: Planetare Grenzen des Stockholm Resilience Center



Quelle: Eigenerstellung in Anlehnung an Stockholm Resilience Center. 2023

### 2.3.6 Internationale Normen

Während das Konzept der Planetaren Grenzen und das Konzept der Sustainable Development Goals wie in Kapitel 2.3.4 und 2.3.5 beschrieben, aggregierte Ziele bereitstellen, die für die Synthese von unternehmensspezifischen Kennzahlen genutzt werden, haben die internationalen Normen DIN EN ISO 14001 und DIN EN ISO 26000 das Ziel, Anforderungen an Managementsysteme für die Nachhaltigkeitstransformation zu standardisieren.

Die DIN EN ISO 26000 ist die weltweit erste Norm zur CSR und damit ein bedeutender Meilenstein zur Systematisierung des Managements der sozialen Verantwortung von Unternehmen (vgl. Franz et al. 2021, S. 6). Die Verbesserung der CSR geschieht durch eine Verbesserung des Vertrauens der Gesellschaft in das Unternehmen und seine Fähigkeit Probleme (mit Produkten oder Dienstleistungen) zu lösen. Dieses gestärkte Vertrauen in das Unternehmen hilft der Organisation, sich einen Wettbewerbsvorteil vor der Konkurrenz zu verschaffen (vgl. DIN EN ISO 26000:2021-04, S. 8; Franz et al. 2021, S. 9). Die Anwendung der DIN EN ISO 26000 bedeutet für die Unternehmen konkret: Etappenziele ableiten; die Entwicklung von geeigneten Messgrößen und Kennzahlen zur Fortschrittskontrolle, strategische Projekte und Maßnahmen definieren (z. B. Digitalisierungsprojekte zur Steigerung der sozialen Nachhaltigkeit), sowie das konsequente Nachverfolgen und Bewerten der Ziele (vgl. Franz et al. 2021, S. 28). Die DIN EN ISO 26000 ist im

---

Gegensatz zur DIN EN ISO 14001 nicht zertifizierbar. Die Norm gibt eine Hilfestellung bei der Entwicklung eines eigenen Managementsystems mit dem Unternehmen die CSR systematisch steuern und verbessern können (vgl. Franz et al. 2021, S. 7–8).

Die Anwendung der Norm ist freiwillig (vgl. Franz et al. 2021, S. 7). Die Norm gibt zahlreiche Handlungsempfehlungen vor, um Systeme zum Management der CSR zu entwickeln. Die Kernfelder des Managements der sozialen Verantwortung sind bspw. die Organisationsführung und Arbeitspraktiken (vgl. DIN EN ISO 26000:2021-04, S. 35). Auch die DIN EN ISO 2600 folgt, wie die DIN EN ISO 14001 und die Norm DIN EN ISO 9001 dem Gedanken der Systemtheorie (s. Kapitel 2.3.1). Eingangsgrößen des CSR Managements sind u. a. der Umfang der gesellschaftlichen Verantwortung, die betrieblichen Definitionen und Anforderungen an die CSR, das Verständnis der CSR und die Prinzipien der sozialen Verantwortung wie Transparenz und Gesetzestreue (vgl. DIN EN ISO 26000:2021-04, S. 21).

Zwei fundamentale Prinzipien sind wichtig, um die CSR zu steuern und zu verbessern. Zum einen muss die CSR anerkannt, die Stakeholder identifiziert und die Bedürfnisse der Anspruchsgruppen an das Unternehmen erfüllt werden. Die Kommunikation der CSR und die kontinuierliche Verbesserung der Initiativen zur Steuerung der CSR sind ebenfalls zentrale Elemente bei der Umsetzung der Norm (vgl. DIN EN ISO 26000:2021-04, S. 21; DIN EN ISO 26000:2021-04, S. 24–28; IWA 26:2017, S. 14). Die Implementierung der DIN EN ISO 26000 trägt unmittelbar zum Erreichen der SDGs bei (vgl. International Organization for Standardization 2023).

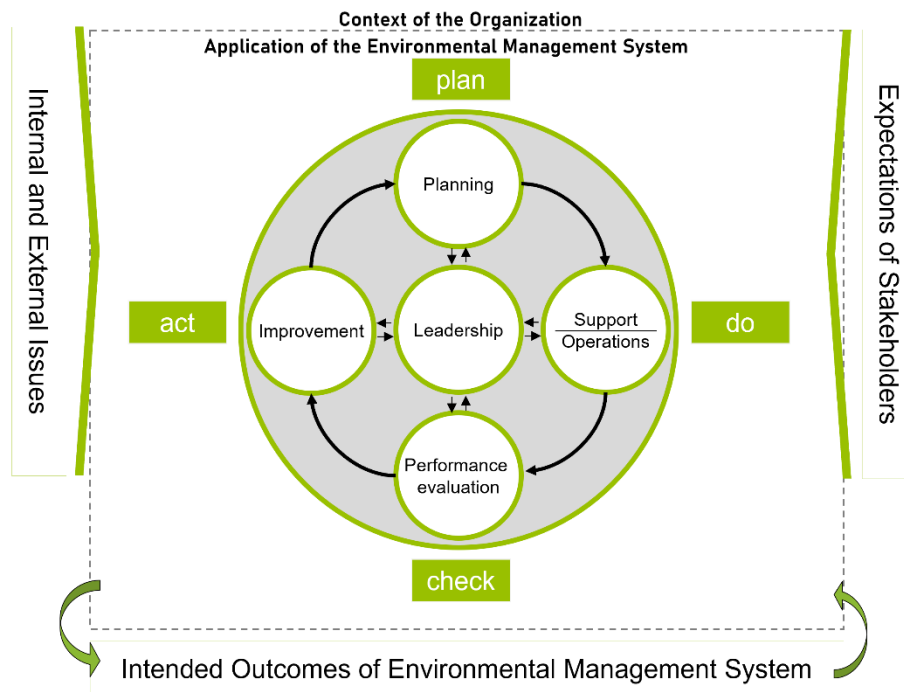
Die Norm DIN EN ISO 14001 zu UMS ist zertifizierbar. Bisher sind mehr als 300.000 Unternehmen weltweit nach der Norm zertifiziert. Damit ist die DIN EN ISO 14001 eine der wichtigsten internationalen Normen (vgl. Beuth Verlag. 2023). Umweltmanagement ist der Teil des Managements im Unternehmen, der sich mit Umweltaspekten (ökologisch, sozial und ökonomisch) und Umweltrisiken beschäftigt. Dabei sollen systematisch und ganzheitlich alle Einflüsse aus Tätigkeiten, Produkten und Dienstleistungen erfasst werden (vgl. Umweltbundesamt. 2020). Umweltmanagementsysteme beinhalten daher eine Vielzahl an Prozessen zu allen Tätigkeiten des Unternehmens, wie in Abbildung 6 zu sehen ist. Zu den Tätigkeiten des Unternehmens gehören die Führungsprozesse, Verbesserungs- bzw. Optimierungsprozesse wie der PDCA (s. Kapitel 4.3.4) und die unternehmensspezifischen Kernprozesse wie Betriebs- oder Unterstützungsprozesse. Die fortlaufende Verbesserung der Eignung, Angemessenheit und Wirksamkeit des Managementsystems ist eine zentrale Anforderung an das Umweltmanagement (vgl. DIN EN ISO 9001:2015, S. 49). Audits sind die Grundlage um die Einhaltung des Systems und die kontinuierliche Entwicklung der Systemelemente zu überprüfen (vgl. DIN EN ISO 9000:2015, S. 24). Das UMS nach der Norm DIN EN ISO 14001 ist ein leistungsorientiertes und prozessorientiertes Management der Umweltsleistung von Unternehmen. Daher empfiehlt die Norm DIN EN ISO 14001 zur Erfassung der Umweltsleistung (Umwelt-) Kennzahlen im Unternehmen einzuführen (vgl. Weiß et al. 2013, 12).

Die Frage ob UMS, Nachhaltigkeitsstandards und Prozessmodelle einen kompetitiven Vorteil hervorrufen oder nur einen Kostenfalle darstellen beschäftigt die Forschung. Viele Arbeiten zeigen, dass die Implementierung von Nachhaltigkeitsstandards wie der DIN EN ISO 14001 einen kompetitiven Vorteil erzeugen. Eine Studie an 1333 vietnamesischen SMEs zeigt, dass die Ressourceneffizienz in Industrieunternehmen durch die Einführung des UMS aus der DIN EN ISO 14001 gesteigert wird (vgl. Fadly. 2020, S. 1). Die Studie weist nach, dass zertifizierte SMEs eine geringere Ressourcenintensität, in Bezug auf Wasserverbrauch,

Treibstoffverbrauch und Elektrizität haben als die nicht zertifizierten SMEs (vgl. Fady. 2020, S. 17). Ein weiterer Vorteil, der durch die Implementierung des ISO-Standards entsteht, ist eine gleiche Grundlage innerhalb der Lieferkette. Die Angleichung von Unternehmen birgt aber auch Risiken, da durch fehlende Differenzierung kompetitiver Vorteil verloren geht. Entscheidend für die Wahrung der Wettbewerbsfähigkeit ist der Zeitpunkt, zu dem die Einführung der Norm DIN EN ISO 14001 stattfindet. So ist der Einfluss positiv wenn die Norm frühzeitig eingeführt wurde (Early Mover Effect) und weniger positiv für Unternehmen die erst spät zur Implementierung der Norm übergegangen sind (vgl. Su et al. 2015, S. 31).

Die Einbeziehung der Mitarbeitenden, die Unterstützung durch das Top Management und die Entwicklung von technischen umweltbezogenen Fähigkeiten im Unternehmen sind die wichtigsten Erfolgsfaktoren bei der Umsetzung von UMS (vgl. Chiarini. 2019, S. 801–802). In der Abbildung 6 ist dargestellt, wie die Kernelemente des in der Norm DIN EN ISO 14001 vorgeschlagenen Umweltmanagements in Beziehung gebracht werden. Die Führung steuert zentral die Planung, die Unterstützungs- und Betriebsprozesse sowie die Leistungsmessung und -verbesserung. Das UMS verarbeitet internen und externen Input. Ziel ist die Erfüllung der definierten Nachhaltigkeitsziele des Unternehmens. Die zentrale Rolle der kontinuierlichen Verbesserung steht nicht nur beim UMS der DIN EN ISO 14001 im Mittelpunkt, sondern auch bei einschlägigen bekannten Normen wie der DIN EN ISO 9001, welche die Anforderungen an das heute weit verbreitete prozessorientierte Qualitätsmanagement beinhaltet. Dies zeigt das für den Aufbau von Managementsystemen ein international geteiltes gemeinsames Verständnis herrscht (DIN EN ISO 14001:2015, S. 17; DIN EN ISO 9001:2015, S. 12–14).

**Abbildung 6:** Grafische Darstellung eines UMS nach der Norm DIN EN ISO 14001 und des PDCA-Zyklus



Quelle: Eigenerstellung in Anlehnung an DIN EN ISO 14001:2015, S. 17; VOREST AG. 2023a

---

### 2.3.7 Sustainability Balanced Scorecard

Während sich die internationalen Normen DIN EN ISO 14001 und DIN EN ISO 26000 auf die Definition von Anforderungen an Managementsysteme richten, versucht die Sustainability Balanced Scorecard mithilfe von aggregierten Kennzahlen und zugrundeliegenden Ursache-Wirkungsbeziehungen mit mathematischen Verknüpfungen (auch: rechentechnische Verknüpfungen) ein System zu entwickeln, das in Unternehmen genutzt werden kann um die Umweltleistung zu steigern und zu steuern (vgl. Figge et al. 2001, S. 18–19).

Bisher werden von Entscheidungsträgern in Unternehmen, gerade bei Nachhaltigkeitszielen, oftmals nur verbale Ziele definiert. Immer mehr Forschungsarbeiten konzentrieren sich daher auf die Quantifizierung von Nachhaltigkeitszielen. Die SBSC (Sustainability Balanced Scorecard) ist hier ein geeigneter Ansatz (vgl. Singh et al. 2018, S. 16). In der Literatur wird beschrieben, dass die Definition von geeigneten KPIs (Key Performance Indicator(s), deutsch: Leistungskennzahlen) zur Messung der Umweltleistung, insbesondere auch im Bezug zur dreigeteilten Nachhaltigkeit, die größte Schwierigkeit für Unternehmen darstellt. Die SBSC wird unter anderem genutzt geeignete KPIs in den Bereichen der ökologischen, wirtschaftlichen und sozialen Nachhaltigkeit zu definieren (vgl. Wang et al. 2015, S. 181).

Die Sustainability Balanced Scorecard wird auch angewendet um die wertorientierte Führung eines Unternehmens um die Steuerung der Umweltleistung zu ergänzen. Hier wird von einer Umweltperspektive gesprochen, die zu den Perspektiven der traditionellen BSC (Balanced Scorecard) ergänzt wird. Diese sind die Finanzperspektive, die Kundenperspektive, die Entwicklungs- und Lernperspektive und die Perspektive der internen Prozesse. Eine weitere Möglichkeit: In jeder Perspektive der traditionellen BSC werden Kennzahlen zur Umweltleistung der Unternehmen ergänzt. Diesen Kennzahlen wiederum liegen definierte und ausformulierte oder graphisch dargestellte Ursache-Wirkungsbeziehungen zugrunde, welche die aggregierten Kennzahlen entlang der unternehmensspezifischen Prozesse aufgliedern (vgl. Figge et al. 2001, S. 23–24). Eine dritte Möglichkeit ist die Entwicklung einer separaten Umwelt-BSC, welches jedoch nicht empfehlenswert ist, da hierdurch keine wirkliche Integration von Umweltkennzahlen in bestehende Managementsysteme stattfindet. In Anhang 5 ist grafisch dargestellt, wie eine Sustainability Balanced Scorecard in der praktischen Umsetzung als Integration von Nachhaltigkeitskennzahlen in die vier bestehenden Perspektiven integriert (1), als eigenständige Perspektive ergänzt (2) oder als gänzlich neue, aber auch isolierte, Scorecard (3) aufgebaut werden kann (vgl. Figge et al. 2001, S. 28; Ilg. 2019).

Die SBSC bildet die Brücke zwischen den strategischen Zielen, welche wie in Kapitel 2.3.4 gezeigt, bspw. aus den SDG abgeleitet werden können und der operativen Steuerung der Nachhaltigkeit im Unternehmen. Die disaggregierten Kennzahlen können in Unternehmen genutzt werden um Betriebsprozesse zu steuern (vgl. Trisyulianti et al. 2023, S. 1536). Somit stellt die SBSC ein Werkzeug dar, mit dem in der Unternehmensführung und dem Management aggregierte strategische Kennzahlen in operative Kennzahlen überführt werden.

---

### 2.3.8 Circular Economy

Auch wenn das Konzept der Kreislaufwirtschaft strenggenommen nicht zu den Nachhaltigkeitszielsystemen gehört, da es weder qualitative oder quantitative Grenzwerte, Kennzahlen noch ein System vorgibt, mit dem die Unternehmen Nachhaltigkeit erreichen, gehört das CE-Konzept heute zu einem der bekanntesten und wichtigsten Konzepte bei der Erreichung von Nachhaltigkeitszielen. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass viele Industrieunternehmen die Erreichung einer Kreislaufwirtschaft als besonders bedeutend für die Erreichung von Nachhaltigkeit ansehen. Die Forschungsgrundlage zur Systematisierung und Konkretisierung von CE mittels Kennzahlen ist groß (vgl. Korhonen et al. 2018, S. 37; Roos Lindgreen et al. 2020, S. 1). Das CE-Konzept fokussiert den 6R-Ansatz (Recognise, Reconsider, Realize, Reduce, Reuse/Repair, Recycle). Hierdurch wird die Ressourceneffizienz gesteigert und die ökologische und wirtschaftliche Nachhaltigkeit maximiert. Ein konkretes Zielsystem wird im CE-Konzept nicht vorgegeben. Daher versucht die Forschung die existierenden Zielsysteme auf ihre Nützlichkeit hinsichtlich der Bewertung und Messung der Kreislauf-Leistung zu untersuchen. Die Untersuchung der Kreislaufleistung kann bspw. durch die Nutzung der SBSC erfolgen (vgl. Sahu et al. 2023, S. 1). Die Verknüpfung eines kennzahlengetriebenen Zielsystems wie der SBSC mit dem Konzept der CE weist positive Effekte auf. Verbessert ein Unternehmen seine produktive und finanzielle Effizienz, so verbessert sich auch die Nachhaltigkeit des Unternehmens. Die Entwicklung eines Zielsystems, das die Leistung, insbesondere bezogen auf den 6R-Ansatz, messen kann, wird für zukünftige Forschungen vorgeschlagen (vgl. Sahu et al. 2023, S. 12). Die Verknüpfung zu den digitalen Technologien ist in der Forschung zur CE ebenso wichtig. Die erfolgreiche Verknüpfung von Industrie 4.0 und dem CE-Konzept führt zu kosteneffizienteren Lösungen in der Produktion, zur Reduktion von Ausfall- und Wartungszeiten, zu Optimierungen des Produktionsflusses und einer Maximierung der Zirkularität der eingesetzten Ressourcen (vgl. Sahu et al. 2023, S. 13; Toth-Peter et al. 2023, S. 1).

Insbesondere in Bezug zu Materialeinsparungen, der Entwicklung zirkulärer Geschäftsmodelle und zur Entwicklung einer nachhaltigen Produktion, sind digitale Technologien von großer Bedeutung. Digitale Technologien müssen insbesondere genutzt werden, um die Lebensdauer von Produktionssystemen zu erhöhen, da dies zu einer Verringerung des Ressourcenverbrauchs führt. Gleichzeitig muss der Ressourcenverbrauch aber auch auf der Ebene der Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe reduziert werden. Die Transportzeiten in und zwischen Produktionsstandorten müssen reduziert werden. Abfall durch die Produktion muss minimiert werden. Die verwendeten Ressourcen müssen biokompatibel und recyclebar sein. Für alle diese Aspekte ist die Weiterentwicklung zirkulärer Modelle wichtig (vgl. Vezzoli. 2022, S. 53–54). Die SDGs stellen für die Industrie einen Aktionsplan mit priorisierten strategischen Zielen bereit. Das CE-Konzept wirkt insbesondere auf die Ziele zur Ressourcennutzung durch die Entwicklung einer zirkulären Produktion. Den SDGs nach sind insbesondere die Abfallproduktion und die Emission von Treibhausgasen zu minimieren (vgl. Vezzoli. 2022, S. 53).

Das Konzept der CE ist für die Industrie vor allem wegen seiner hohen Verknüpfung von ökologischer und ökonomischer Nachhaltigkeit interessant. Wie zuvor beschrieben, ist für die meisten Unternehmen der Business Case for Sustainability ein wichtiges Element bei der nachhaltigen Transformation. Die Europäische Kommission erwartet 600 Milliarden Euro jährliche Gewinne für den produzierenden Sektor durch die Implementierung von CE. Das Strategieberatungshaus McKinsey rechnet mit 2.5 Milliarden Euro alleine in Finnland (vgl. Korhonen et al. 2018, S. 37). Die Nachhaltigkeitstransformation muss offensichtlich

---

nicht bedeuten, dass Unternehmen zu hohen Investitionen gezwungen sind, die sich wirtschaftlich nicht rechnen. Die Beliebtheit des CE-Konzeptes wird vor diesem Hintergrund verständlich.

## 2.4 Nachhaltigkeitsziele in Industrieunternehmen

Die Einführung von Systemen zur Messung und Quantifizierung von Nachhaltigkeit ist für Unternehmen wichtig, da ein besseres Verständnis ermöglicht wird, inwiefern die Unternehmen Nachhaltigkeitsziele erfüllen. Außerdem können Unternehmen ihre Wettbewerbsfähigkeit stärken und den kritischen Erfolgsfaktor Nachhaltigkeit besser erfassen (vgl. Contini und Peruzzini. 2022, S. 1). Die Definition von messbaren Kriterien zur Bewertung von Nachhaltigkeitspotenzialen in der Industrie ist nicht nur für die Wettbewerbsposition entscheidend, sondern auch für die nachhaltige Optimierung interner Prozesse. Die Nutzung von Metriken für die Messung und Optimierung interner Prozesse verschiedener Industrien, wie dem produzierenden Gewerbe, gewinnt in vielen Unternehmen zunehmend an Bedeutung. Dies liegt u. a. auch an dem Voranschreiten der Entwicklung und Implementierung von nachhaltigen Strategien (vgl. Afum et al. 2021, S. 1089–1090). Für die produzierende Industrie ist es von großer Bedeutung, bei Produktions- und Produktentstehungsprozess, nachhaltige Metriken zu nutzen. In den vorangegangenen Kapiteln zu den Nachhaltigkeitszielsystemen wurden einige Systeme vorgestellt die strategischen Ziele angeben. Für die Implementierung von digitalen Technologien sind die Shop-Floor (d.h. in der Produktion bspw. an der Maschine) gemessenen Kennzahlen (operative Kennzahlen) von ebenso großer Bedeutung. Eben diese Kennzahlen werden zumeist direkt durch die Implementierung von digitalen Technologien und analogen Technologien sowie Prozessanpassungen verbessert.

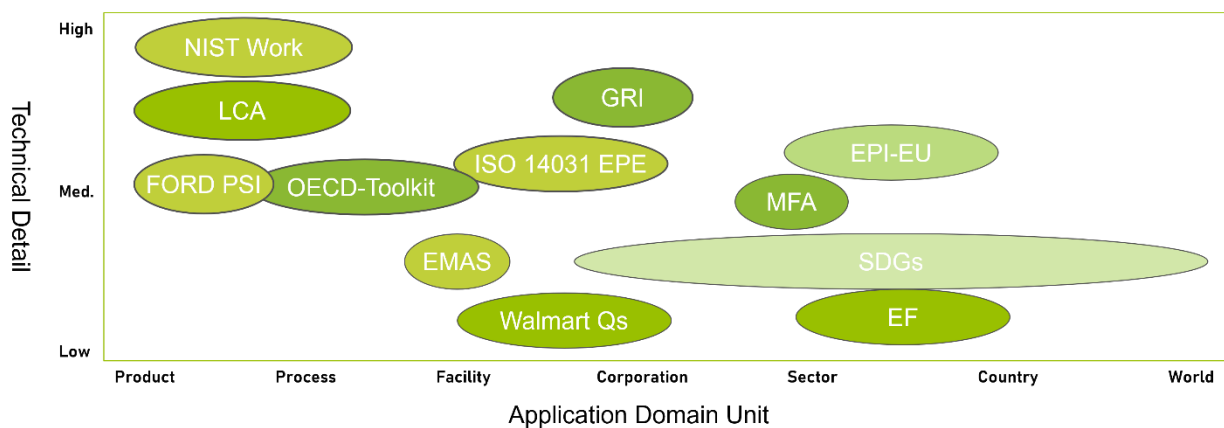
Es müssen gezielt operative KPIs in den drei Dimensionen der ökologischen Nachhaltigkeit, der ökonomischen Nachhaltigkeit und sozialen Nachhaltigkeit im Unternehmen implementiert werden (vgl. Contini und Peruzzini. 2022, S. 1). In Kapitel 2.2.2 wurden die drei Dimensionen ökologisch, ökonomisch und sozial als am häufigsten verwendete Dimensionen von Nachhaltigkeit in der Industrie identifiziert. Die Forschung zu Dimensionen für Nachhaltigkeitskennzahlen in der Industrie empfiehlt ebenfalls die Nutzung der TBL. Mehrere Forschungen, die im Folgenden näher untersucht werden, nutzen ebenfalls die Dreiteilung der Triple Bottom Line (vgl. Ayabaca und Vila. 2020, S. 5; Peças et al. 2023, S. 2; Silva, S. 1). Die Ziele, die für die Messung der Umweltleistung genutzt werden, sollen nachfolgend in strategische und operative Ziele untergliedert werden. Dabei sind strategische Ziele solche Ziele, die sich als aggregierte Ziele ergeben, während operative Ziele Shop-Floor messbar sind.

Die vorangegangenen Kapitel stellen Nachhaltigkeitszielsysteme vor und ordnen diese ein. Gleichermaßen werden Verbindungen zwischen den Systemen aufgezeigt. Dabei stehen der Aufbau, die Inhalte und die Ziele der Systeme im Vordergrund. In diesem Kapitel werden Nachhaltigkeitsziele auf ihren technischen, sowie den Zeit- und Nachhaltigkeitsbezug geprüft. Dazu werden wichtige Forschungsartikel vorgestellt, die strategische und operative KPIs untersuchen, welche in den Methoden der Nachhaltigkeitsbewertung (bspw. Life Cycle Assessment) genutzt werden können. Diese Methoden können dann im SIA-DT Prozess eingesetzt werden, um die Nachhaltigkeit von Technologien und digitalisierten Prozessen zu bewerten. Außerdem zeigen die Ziele, welche Ebenen und Phasen bei der Bewertung von Nachhaltigkeit besonders wichtig sind. Dies wird im Prozessdesign des SIA-DT Modells berücksichtigt. Dieses Kapitel wird Nachhaltigkeitsziele in das dreidimensionale Verständnis der Nachhaltigkeit einordnen.

## 2.4.1 Strategische Nachhaltigkeitsziele

Die Bedeutung von strategischen Zielen ist vor dem Hintergrund der nachhaltigen Entwicklung von Unternehmen und ganzer Staaten nachvollziehbar und wird in vorangegangenen Kapiteln beleuchtet. Es wird gezeigt, dass Zielsysteme genutzt werden, um die nachhaltige Entwicklung im Unternehmen zu steuern. Strategische Ziele werden zum Beispiel für die Entwicklung von Reifegradmodellen genutzt (vgl. Barletta et al. 2021, S. 2; Seyfried et al. 2023, S. 51). Der Bedarf für Nachhaltigkeits-KPIs in der Industrie steigt stetig. Mehrere Gründe sind dafür verantwortlich. Zum einen steigen die Anforderungen an das Reporting der Nachhaltigkeit gegenüber Stakeholdern des Unternehmens. Gleichzeitig wollen immer mehr Unternehmen in der Lage sein, den Einfluss von Initiativen, Produkten und Prozessen auf das Unternehmensumfeld und die Nachhaltigkeit des Unternehmens zu bewerten. Hierzu werden nachhaltige Zielwerte wie KPIs benötigt (vgl. Feng und Joung. 2010, S. 2).

**Abbildung 7:** Existierende Zielsysteme und deren Anwendungsbereiche



Quelle: Eigenerstellung in Anlehnung an Feng und Joung. 2010, S. 3

Wie in Abbildung 7 dargestellt, werden verschiedene Ziele bzw. Werkzeugkästen und Sammlungen von Nachhaltigkeitszielen für unterschiedliche Domänen eingesetzt. In der Abbildung ist zu erkennen, dass viele der Zielsysteme keinen allzu hohen technischen Bezug haben. Ausnahmen sind hier bspw. die Lebenszyklusanalyse und der Ford Product Sustainability Index (FORD PSI). Das National Institute of Standards and Technology (NIST) bspw., bietet Ziele an, die einen hohen technischen Bezug besitzen. Einige Forschungen sammeln verschiedene KPIs und konsolidieren diese, um einen stärkeren Bezug zur Industrie herzustellen.

Contini und Peruzzini fassen in einer umfangreichen Metastudie zusammen, aus welchen Bereichen die wichtigsten Umweltziele stammen, die in der Industrie am häufigsten verwendet werden. Im Folgenden wird kurz dargestellt, welche Bereiche für strategische Ziele in der Nachhaltigkeitstransformation am wichtigsten sind (vgl. Contini und Peruzzini. 2022, S. 20–23). Die entsprechenden KPIs zur Messung und Steuerung von Nachhaltigkeit in diesen Bereichen werden in Gruppen zusammengefasst (vgl. Contini und Peruzzini. 2022, S. 4).



**Tabelle 3:** Die wichtigsten Bereiche für strategische Ziele in der Industrie

Ecological Indicators	Economic Indicators	Social Indicators
Energy	Turnover	Health
Water	Material Costs	Employee Satisfaction
Waste	Quality	Staff Training
Raw Materials	Labor Costs	Noise
Greenhouse Gas	Sales	Work Accidents
Recycling	Research & Development Costs	Human Rights
Pollution	Employee Satisfaction	Child Labor
Hazard Materials	Supply Chain Costs	Wages
Global Warming	Energy Costs	Diversity
Ozon Depletion	Maintenance Costs	Community Projects

Quelle: Eigenerstellung in Anlehnung an Contini und Peruzzini. 2022, S. 20–23

Die Zielbereiche für Nachhaltigkeits-KPIs der Metastudie sind in Tabelle 3 dargestellt. Diejenigen Zielbereiche, die zuerst genannt werden, sind von höchster Bedeutung, da für diese Zielbereiche die meisten wissenschaftlichen Artikel veröffentlicht wurden. Für soziale Ziele sind die Gesundheit, die Zufriedenheit der Mitarbeitenden, das Training der Mitarbeitenden und die Reduzierung von Lautstärkebelastung die wichtigsten Zielbereiche. Bei den ökonomischen Zielen wurden am häufigsten der Umsatz, die Materialkosten und die Qualität genannt. Bei den ökologischen Faktoren wurden am häufigsten Energieziele, Ziele zum Wassergebrauch und zum Abfall genannt (vgl. Contini und Peruzzini. 2022, S. 19). Diese Angaben decken sich mit den Antworten von Experten/Expertinnen aus dem Management von Industrieunternehmen, welche insbesondere den Energieverbrauch und den Ressourcenverbrauch als wichtige Treiber identifizieren (s. Kapitel 2.7). Für die Strategiefindung im Unternehmen muss daher überprüft werden, in welchen der oben aufgezeigten Bereichen noch Verbesserungsbedarf besteht. Dies kann mittels eines Reifegradmodells durchgeführt werden, wie es bspw. die Autoren Barletta et al. vorschlagen (vgl. Barletta et al. 2021, S. 2).

Für konkrete strategische Zielformulierung wird an dieser Stelle auf die Kapitel 2.3.5 und 2.3.4 verwiesen, welche Beispiele für konkrete Ziele bieten. Auch das nachfolgende Kapitel wird sich mit konkreten KPIs befassen.

#### 2.4.2 Operative Nachhaltigkeitsziele

Angestoßen wurde die Entwicklung operativer Kennzahlen zur Nachhaltigkeitssteuerung und -verbesserung durch den Bericht der Brundtlandt Kommission (Our Common Future). Zum damaligen Zeitpunkt implementierten immer mehr Unternehmen strategische Nachhaltigkeitsziele. Entsprechend entstand der Bedarf an operativen KPIs, der erst mit der Entwicklung weiterer umfangreicherer Zielsysteme wie den SDGs die größte Aufmerksamkeit in der Forschung erreichte (vgl. Ayabaca und Vila. 2020, S. 1). Die Nutzung von KPIs zeigt sich in vielen Bereichen des Managements als effektiv. Auch bei der nachhaltigen Transformation von Unternehmen werden solche Indikatoren verwendet (vgl. Zackrisson et al. 2017, S. 457). Neben den strategischen Zielen stehen bei Entscheidungen, Analysen und Bewertungen im

**Abbildung 8:** KPIs entlang der verschiedenen Ebenen in der Industrie



Quelle: Feng und Joung 2010, S. 4 mit geringfügigen Anpassungen

Produktionsumfeld, insbesondere im Shop Floor (in der Produktion selbst), operative Kennzahlen im Zentrum der Steuerungs- und Entscheidungsprozesse. Sei es im Lean Management (vgl. Zalatar und Clark, 2021, S. 328), im Qualitätsmanagement (vgl. DIN EN ISO 9001:2015, S. 20) oder Umweltmanagement (vgl. DIN EN ISO 14001:2015, S. 42).

Für operative Kennzahlen in der Produktion gibt es eine eigene Literaturgrundlage und Nutzungsempfehlungen, die sich oftmals mit den Empfehlungen der vorgestellten Nachhaltigkeitszielsysteme überschneiden. Jüngste Forschungen konzentrieren sich nicht mehr nur auf die Definition von geeigneten KPIs, sondern evaluieren auch den Einfluss, den die Einführung solcher KPIs im Shop Floor auf die Nachhaltigkeit in der Unternehmensebene hat. Eine immer wieder zitierte und bedeutende Studie ist die Studie von Zackrisson et al., welche an schwedischen Konzernen durch eine empirische Shop Floor Studie zeigt, dass 90% der eingeführten Shop Floor Nachhaltigkeitsindikatoren einen direkten oder indirekten positiven Einfluss auf die Nachhaltigkeitsleistung der Unternehmen haben. Dabei wurde bei 26% der KPIs festgestellt, dass diese einen direkten oder indirekten Einfluss auf die ökologische Nachhaltigkeit des Unternehmens haben (vgl. Zackrisson et al. 2017, S. 457–458). Für die Nachhaltigkeitsbewertung eines Fertigungsprozesses, wie in der Forschung von Lu et al. am Beispiel eines Bohrprozess gezeigt wird, werden ebenfalls operative Kennzahlen verwendet (vgl. Lu et al. 2012, S. 60). Auch die Studie von Ayabaca und Vila betrachtet die Verzahnung von strategischen (sog. High-Level) KPIs und den operativen (Low-Level) KPIs in der Zerspanung mit dem Ergebnis: Die Verknüpfung von strategischen und operativen KPIs lässt sich für die Definition von neuen Verbesserungs- und Optimierungsstrategien nutzen (vgl. Ayabaca und Vila. 2020, S. 1).

Das UMS der Norm DIN EN ISO 14001, welches in dieser Arbeit eine zentrale Rolle einnimmt, ist für die Einbettung des SIA-DT Prozesses besonders gut geeignet. Hierzu folgt später mehr. Das UMS stellt folgende Bedingungen für die Messung der Umweltleistung in Unternehmen: Eine klare Definition der Messgröße; die Definition der Methoden zur Messung, die Auswahl geeigneter Kennzahlen zur

Umweltleistung; die Terminierung der Zeitpunkte der Messung und eine strukturierte Dokumentation der Ergebnisse (vgl. DIN EN ISO 14001:2015, S. 42). Diese Beispiele sollen zeigen, dass quantitative und qualitative Metriken im Management eine wichtige Rolle spielen, insbesondere in der Produktion, da diese von Natur aus ein großes Potenzial für die Erhebung von Kennzahlen bietet (vgl. Feng und Joung, 2010, S. 1).

Nachhaltigkeitsmetriken können auf verschiedenen Ebenen in der Produktion eingeführt werden (vgl. Lu et al. 2012, S. 60). In der Abbildung 8 sind Kennzahlen benannt, die auf den jeweiligen Hierarchieebenen erhoben werden können, um Nachhaltigkeit zu steuern und zu bewerten. Dabei werden Kennzahlen der höheren Ebene wie beispielsweise der Supply Chain Ebene oder der Unternehmensebene durch die Aggregation von Kennzahlen niedriger Ebenen und Kennzahlen niedrigerer Ebenen durch die Dekomposition von Kennzahlen höherer Ebenen gebildet. So lassen sich Ursache-Wirkungsbeziehungen determinieren, die wiederum zur Entwicklung eines Kennzahlensystems genutzt werden können (s. Kapitel 2.3.7). Neben der hierarchischen Aufteilung werden auch operative Ziele in der Literatur oftmals in den drei Dimensionen der TBL klassifiziert. Es gibt zahlreiche KPIs die für die Industrie in Frage kommen. Insbesondere wenn es um die Messung der Leistung von Fertigungsprozessen in den Bereichen der ökologischen, ökonomischen und sozialen Nachhaltigkeit geht. In der Tabelle 4 werden einige Kennzahlen aufgeführt, die in verschiedenen Artikeln genannt werden und veranschaulichen, dass es ohne große Mühe gelingt, Indikatoren aus allen drei Bereichen zu definieren, die messbar und steuerbar sind.

Die Kennzahlen aus Tabelle 4 sind nach drei Dimensionen der TBL eingeteilt. Für das Management können diese Kennzahlen hilfreich sein, um die Nachhaltigkeitsleistung von Prozessen in der Fertigung zu steuern und Verbesserungen und Optimierungen zu prüfen. Um bei der Verbesserung von Nachhaltigkeit durch digitale Technologien, während der gesamten Implementierung einen Nachhaltigkeitszielbezug zu wahren, wird der SIA-DT Prozess entwickelt.

**Tabelle 4:** Auswahl von operativen KPIs für Fertigungsprozesse

Ecological Indicators	Economic Indicators	Social Indicators
Material Reuse Ratio [%], Mass of Waste Production [kg], GHG Emission from Energy Consumption [ton CO <sub>2</sub> eq.], Noise-Level [dB], Ratio of Use of Renewable Energy [%], Water Use [l], Direct GHG Emission [ton. CO <sub>2</sub> Equivalent], Material Utilization Ratio [%], Production of Hazard Materials [kg]	Cost per Part [€/pc.], Digitalization Cost [€], Recycling Cost [€/kg], Energy Cost [€/kWh], Production Volume [pcs./24h], Production Time [h/pc.], Employee training Cost [€/employee], Processing-tools related Costs [€/pc.], Change over Time [min], Different Measures of Productivity [%], OEE [%]	Employee satisfaction [dimensionless], Chemical Contamination of Working Environment [mg/m <sup>3</sup> ], Mist/Dust Level [mg/m <sup>3</sup> ], Noise Level [dB], Physical Load index [dimensionless] Health-related Absenteeism rate [%], Steps per Employee per Day [dimensionless]

Quelle: Eigenerstellung in Anlehnung an Ayabaca und Vila. 2020, S. 5; Contini und Peruzzini. 2022, S. 8; Lu et al. 2012, S. 60

---

## 2.5 Modelle der Nachhaltigkeitsbewertung

Modelle zur Nachhaltigkeitsbewertung sind an vielen Stellen einsetzbar. In der Industrie werden diese bspw. in der Produktion bzw. entlang des Produktentstehungsprozesses (PEP) verwendet. Nachfolgend werden die Methoden der Reifegradmodelle, der Lebenszyklusanalyse (englisch: Life Cycle Assessment, LCA) sowie des Sustainability Quality Function Deployment vorgestellt, da diese in vielen Artikeln, auf denen diese Arbeit aufbaut, genutzt werden. Dieses Kapitel zeigt, warum Modelle zur Bewertung und Quantifizierung der Nachhaltigkeit von Prozessen und Produkten eine hohe Bedeutung für die Industrie haben. Die Integration verschiedener Werkzeuge wie der SBSC, der LCA, und der SQFD bringt für die nachhaltige Transformation den größten Nutzen. Insbesondere für KMUs, die mit begrenzten Ressourcen die größtmögliche Nachhaltigkeit für ihre Produkte und Prozesse erreichen müssen, ist der Einsatz solcher Methoden hilfreich (vgl. Hsu et al. 2017, S. 643). Auch das SIA-DT Prozessmodell, welches später in der Arbeit vorgestellt wird, reiht sich ein. Der Einsatz von Modellen zur Bewertung der Nachhaltigkeit sowie der Identifikation und Quantifizierung von Nachhaltigkeitszielen wird an mehreren Stellen des SIA-DT Prozess notwendig. Nachfolgend werden gängige Methoden vorgestellt, die für die Identifizierung und Quantifizierung von Nachhaltigkeitspotenzialen und -zielen eingesetzt werden.

### 2.5.1 Nachhaltigkeitsreifegradmodelle

Reifegradmodelle werden in der Nachhaltigkeitsliteratur vielfältig eingesetzt und sind vor allem bei der strategischen Bewertung, sowie der Identifikation von Potenzialen in der Wertschöpfungskette, aber auch in abgegrenzten Bereichen wie einem bestimmten Fertigungsbereich (z. B. der Zerspanung) anwendbar. Sie werden u. a. zur Identifikation von geeigneten Digitalisierungsmaßnahmen und Chancen für die Nachhaltigkeitsverbesserung in der Produktion durch Digitalisierung verwendet. Dabei steht die strategische Analyse von Potenzialen für Digitalisierungsinitiativen und die Analyse der Organisationsstruktur im Vordergrund (vgl. Barletta et al. 2021, S. 2; Facchini et al. 2022, S. 1705; Seyfried et al. 2023, S. 51). Reifegradmodelle sind immer leistungsorientiert. Sie ermöglichen ein nachhaltiges Wachstum und eine nachhaltige Leistungssteigerung (vgl. Carolis et al. 2017, S. 13). Moderne intelligente Fabriken (englisch: Smart Factories) müssen im Stande sein, ökologischer und sauberer zu produzieren und die Umwelt weniger zu belasten, als es bei aktuell betriebenen Fabriken der Fall ist. Reifegradmodelle können genutzt werden, um diejenigen Bereiche zu identifizieren, die eine besonders schlechte oder besonders gute Umweltleistung zeigen (vgl. Bastos et al. 2021, S. 1).

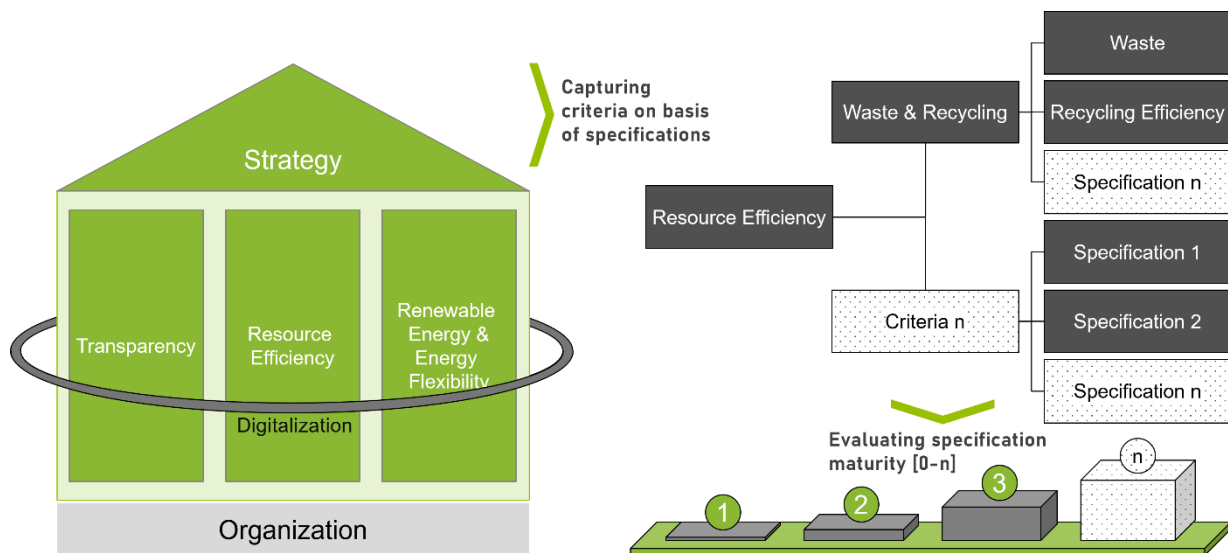
Modelle, die sich spezifisch mit der Digitalisierung in der Produktion beschäftigen, sind bspw. der Industrie 4.0 Maturity Index, der VDMA Industrie 4.0 Werkzeugkasten und das ADAPTATION Modell. Reifegradmodelle sind seit Mitte der achtziger Jahre in der Industrieforschung als bewährtes Mittel etabliert. Im Fokus steht der aktuelle technologische Stand des Unternehmens und Anregungen für mögliche Maßnahmen, die das Unternehmen treffen kann, um seine Leistung (bspw. Kostenziele, Zeitziele und Qualitätsziele) zu verbessern. Innerhalb der Modelle werden Prozesse in Bezug zu einem definierten Vergleichszustand betrachtet und bewertet (vgl. Seyfried et al. 2023, S. 52). Auch beim Vorgehen nach dem SIA-DT Prozessmodell werden Reifegradmodelle im ersten Schritt eingesetzt. Gerade bei mittelständischen und kleinen Unternehmen empfiehlt sich der Einsatz von Reifegradmodellen um zu identifizieren, wo betriebliche

Ressourcen eingesetzt werden sollten um eine größtmögliche Verbesserung der Nachhaltigkeit zu erreichen (vgl. Hein-Pensel et al. 2023, S. 200).

Für ein besseres Verständnis des Aufbaus eines Reifegradmodells ist in Abbildung 9 das Modell von Seyfried et al. zur Klimaneutralität und Digitalisierung in der Produktion dargestellt. In diesem Modell werden zunächst Kerndimensionen der Klimaneutralität und der Digitalisierung bestimmt. Diese sind die Transparenz, die Ressourceneffizienz, die Erneuerbaren Energien und die Energieflexibilität, sowie die Dimension der Digitalisierung. Dabei beziehen sich die ersten drei Dimensionen auf die Klimaneutralität. Die Digitalisierung greift in die anderen Dimensionen ein (bspw. durch Digitalisierungsinitiativen). Für jede dieser Dimensionen werden Kriterien abgeleitet, die diese Dimension antreiben.

In Abbildung 9 ist beispielsweise die Dimension Abfall und Recycling ausgewählt. Seyfried et al. schlagen vor, für jedes Kriterium fünf Ausprägungen bzw. Spezifikationen einzuführen, welche das Kriterium bewirken. Andere Modelle schlüsseln noch weiter auf. Daher ist in der Abbildung 9 die Spezifikation  $n$  aufgeführt. Jedes weitere Kriterium wird mit  $n$  Spezifikationen aufgeschlüsselt. So gelangen Unternehmen von strategischen Dimensionen oder Zielen zu granularen Spezifikationen. Für jede Spezifikation wird dann ein Reifegrad ermittelt. Seyfried et al. schlagen vier Stufen vor. Alternative Modelle schlagen andere Intervalle vor (bspw. 1-10). Daher ist in der Abbildung 9 der Reifegrad  $n$  aufgeführt. Am Reifegrad der jeweiligen Spezifikation können Optimierungsbedarfe abgeleitet werden. Diese Potenziale können bspw. durch die Implementierung digitaler Technologien realisiert werden (vgl. Seyfried et al. 2023, S. 53).

**Abbildung 9:** Aufbau eines Reifegradmodells für Klimaneutralität und Digitalisierung



Quelle: Eigenerstellung in Anlehnung an Seyfried et al. 2023, S. 53

---

## 2.5.2 Life Cycle Assessment

Die Bedeutung von Nachhaltigkeitszielsystemen auf taktischer und operativer Ebene gewinnt zunehmend an Priorität. Die LCA wird u. a. genutzt um zu überprüfen ob Grenzwerte, wie die Planetaren Grenzen, durch die Produkte, Prozesse und Dienstleistungen eines Unternehmens beeinflusst werden und ob die Zielwerte, die sich Unternehmen selbst setzen, eingehalten werden (vgl. Ryberg et al. 2018, S. 2). Die Lebenszyklusanalyse ist eine multikriterielle Methode. Die LCA erfasst systematisch alle Material- und Energieflüsse eines Produktes oder einer Dienstleistung. Die LCA ermöglicht eine Bewertung der Umweltwirkung, die das Produkt oder die Dienstleistung potentiell besitzen (vgl. Su. 2020, S. 37). Während die LCA eine Methodik bietet um Potenziale für die Nachhaltigkeitsverbesserung im Lebenszyklus aufzudecken, gibt es neuere Methoden, wie das Life Cycle Engineering (LCE), welche durch ein nachhaltigkeitsorientiertes Produktdesign die Umwelteinflüsse eines Produktes minimieren (vgl. Desai und Mital. 2021, S. 85; Zschieschang. 2013, S. 5). Auch das sogenannte Design for Sustainability, ein synonyme Begriff für das LCE, dem Design von Produkten und Prozessen für die Maximierung der Nachhaltigkeit, wird eingesetzt. Produkte und Prozesse werden so ausgelegt, dass sie bei der Interaktion mit dem Menschen und der Umwelt keinen Schaden verursachen. Der Gedanke des sozio-technischen Systems liegt dem zugrunde. Gleichzeitig wird der Gedanke des umweltschonenden Designs, welches den gesamten Produktlebenszyklus in Betracht zieht in den Mittelpunkt gerückt. Industrieunternehmen sehen ihre Verantwortung nicht mehr nur in der Herstellung der Produkte, sondern auch in der Wiederverwertung oder dem Recycling. Das Design for Sustainability setzt voraus, die Stellhebel für die Nachhaltigkeitserreichung zu kennen. Hier kommt die LCA zum Einsatz (vgl. Vezzoli. 2022, S. 34).

Die LCA wird angewendet um die Ressourcennutzung und Umwelteinflüsse, die mit den verwendeten Materialien, den Produktionsprozessen oder dem Transport und dem Recycling der Produkte verbunden sind, zu identifizieren und zu quantifizieren (vgl. Marinova et al. 2007, S. 39; Wang et al. 2015, S. 186). Die LCA wird bereits in vielen Ländern in verschiedenen Industriezweigen genutzt. In einigen Ländern wird jedoch der Carbon Footprint (deutsch: CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, CF) häufiger eingesetzt als die LCA, obwohl die LCA ausführlicher und umfangreicher ist. Aktuelle Literatur sieht die CF-Analyse als gute Einführung zur LCA, da die CF Analyse ähnliche Schritte besitzt wie die LCA (vgl. Klos. 2022, S. 252).

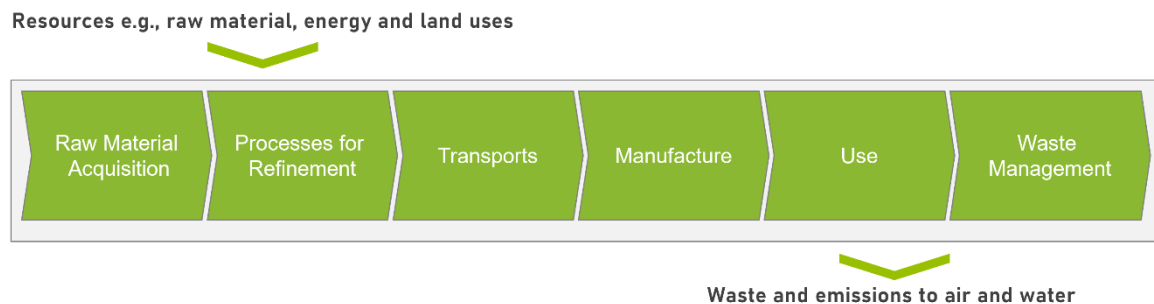
Die Einsatzmöglichkeiten sind vielfältig. Die LCA kann nicht nur in der Industrie angewendet werden, sondern auch in anderen Bereichen, wie in der Stadtplanung, als Stütze für Entscheidungsprozesse. Hierzu wird für neue Prozesse und Technologien zunächst eine LCA durchgeführt, um bei Entscheidungen, neben den herkömmlichen KPIs, auch Nachhaltigkeitskennzahlen im Entscheidungsprozess zu berücksichtigen. Ein entsprechendes Beispiel, wäre hier die Bewertung und Abwägung der Einführung neuer Technologien für die Reduzierung der Luftverschmutzung in Städten (vgl. Klos. 2022, S. 39; Wiheden und Ringström. 2007, S. 695).

Die Abbildung 10 zeigt die ökologische Perspektive auf den Produkt Lebenszyklus (englisch: Product Life Cycle, PLC), dessen Phasen den Ausgangspunkt der Betrachtung der LCA bilden. In der Literatur zur LCA wird häufig vom Cradle-to-Grave Ansatz gesprochen. Dies heißt, dass die LCA den gesamten Lebenszyklus des Produktes, von der Wiege (englisch: Cradle) bis zum Grab (englisch: Grave), betrachtet (vgl. Wiheden und Ringström. 2007, S. 695). Die LCA wird immer in Bezug zur Optimierung von Prozessen und Produkten oder zur Entscheidungsunterstützung für den Einsatz von Technologien oder im Design eingesetzt. Die

Zielgruppe einer LCA kann sowohl intern oder extern als auch technisch oder nicht technisch sein (vgl. Zschieschang. 2013, S. 13). Bei der LCA Methode wird für die frühen LCA Phasen wie der Zieldefinition und der Definition des Anwendungsbereichs, eine Zusammenarbeit zwischen Entscheidungsträgern und technischen Experten gebraucht (vgl. Zschieschang. 2013, S. 6).

Ähnlich wie zu anderen Methoden, Systemen und Prozessen, gibt es auch zur LCA eine eigene Norm die alle Begriffe definiert, die in Bezug zur LCA stehen (vgl. International Organization for Standardization 2023). Für ein besseres Verständnis der LCA wird daher die Norm ISO 14040 empfohlen. Die Norm DIN EN ISO 14044 hingegen, gibt die Anforderungen und Richtlinien für die Durchführung der LCA an. Die normgerechte Umsetzung der LCA im Unternehmen trägt zum SDG 12 Responsible Consumption and Production und SDG 13 Climate Action bei (International Organization for Standardization 2023). Die Durchführung der LCA wird heute von Software unterstützt. Mithilfe einiger Anwendungen kann die LCA für Produkte oder Prozesse sogar in Echtzeit durchgeführt werden (bspw. mit der Software ECO-it). Die benötigten Daten werden hierzu als Flat Data (strukturierte tabellarische Daten) eingegeben. Insgesamt sind die Softwareprodukte SimaPro, Gabi und openLCA führende Softwareprodukte für die digitale LCA, da sie die ausführlichsten Analysen erlauben und gut mit dem digitalen Ökosystem verknüpft werden können (vgl. Su. 2020, S. 61).

**Abbildung 10:** Die ökologische Sicht auf den PLC

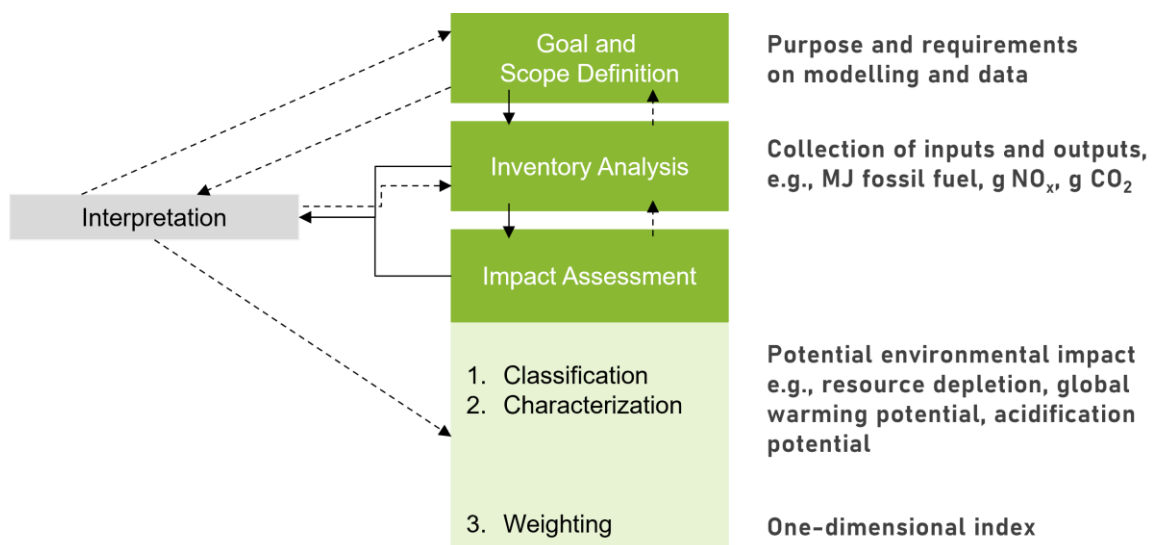


Quelle: Eigenerstellung in Anlehnung an Widheden und Ringström. 2007, S. 696; Anderl. 2020, S. 15

Die LCA wird in vier iterativen Kernphasen durchgeführt. Bei jeder Iteration steht die Reduzierung der Unsicherheit bezüglich potentieller Umwelteinflüsse im Vordergrund (vgl. Widheden und Ringström. 2007, S. 696–697). Dabei untersucht die LCA die Nachhaltigkeitspotenziale in jeder Phase des PLC. Die Abbildung 11 zeigt die Arbeitsschritte einer LCA. Zunächst werden die Ziele und der Betrachtungsbereich (z. B. Phasen des PLC) festgelegt. Der Zweck der LCA wird in dieser Phase definiert. Dies können beispielsweise Zielgruppen sein, die angesprochen werden sollen und Kennzahlen, die hierfür ermittelt werden müssen. Der Umfang beschreibt nicht nur PLC-Phasen, die betrachtet werden, sondern grenzt auch die Prozesse ein, die im Unternehmen analysiert werden. Abschätzungen werden getroffen, welche Umweltparameter durch den Prozess oder das Produkt beeinflusst werden könnten. Im zweiten Schritt wird der Produktionsprozess modelliert (bspw. als Flowchart) und Systemgrenzen definiert. Daten für den Beobachtungsbereich werden erhoben und die Berechnung von Kennzahlen, auf Basis der Datengrundlage, erfolgt. Für die Darstellung des Prozesses oder des Produktes werden Daten zum Materialinput, dem Energiebedarf sowie weiteren materiellen und immateriellen Inputs benötigt. Außerdem werden alle

Kuppelprodukte aufgeführt, die ggf. entstehen. Letztlich werden die Emissionen sowie weitere umweltbelastende Outputs ermittelt. In dieser Phase sollen Fragen beantwortet werden wie bspw.: Wo werden die Emissionen gemessen und mit welcher Unsicherheit sind die Messungen behaftet? Welche Inputs und Outputs werden in den einzelnen Phasen des PLC gemessen? Welche Stellhebel gibt es in jeder Phase? Beim Impact Assessment wird beschrieben, welchen Einfluss ein Produkt oder eine Technologie auf die Umwelt hat. Es kann ein Benchmarking zwischen verschiedenen Alternativen durchgeführt werden. Die Umweltbelastungen werden im Rahmen des Impact Assessment verschiedenen Kategorien zugeordnet, um zu ermitteln, in welchen Kategorien die Umwelt durch das Produkt oder den Prozess belastet wird. Dies können zum Beispiel der Klimawandel, die Biodiversität, die Ozon Schicht und andere Kategorien (abgeleitet bspw. aus den Planetaren Grenzen oder den SDGs) sein. In der letzten Phase der Interpretation, die teilweise schon während der drei zuvor genannten Schritte geschieht, sollen die Ergebnisse verfeinert und aufbereitet werden, so dass diese zielgruppengerecht präsentierbar sind und der Informationsgehalt verdichtet wird. Ausgehend hiervon, werden Produktdesign oder die Technologieauswahl angepasst. Die Ergebnisse werden zuletzt noch einmal auf die Robustheit überprüft. Dies kann bspw. durch eine Sensitivitätsanalyse, eine Variationsanalyse, eine Unsicherheitsanalyse oder eine Vollständigkeitsanalyse geschehen (vgl. Wihheden und Ringström. 2007, S. 697–703).

**Abbildung 11:** Arbeitsablauf der LCA in 4 Phasen



Quelle: Eigenerstellung in Anlehnung an Wihheden und Ringström. 2007, S. 697

Auch wenn viele wissenschaftliche Artikel betonen, dass die LCA für die Bewertung der Nachhaltigkeit von Prozessen und Technologien genutzt werden kann, gibt es bisher wenige Arbeiten, die die LCA für die Technologiebewertung anwenden. Eine Arbeit, die ein Vorgehen für eine LCA in der Technologiebewertung nutzt ist die Dissertation von Zschieschang. Ähnlich wie in dieser Arbeit, nutzt auch Zschieschang die Grundlagen der Theorie zu Systemen und Prozessen um eine Methodik zu entwickeln, mit der die LCA für die Technologiebewertung angewendet werden kann. Die entwickelte Methodik, wird eingesetzt um den Einfluss neuer Technologien auf Produkte und Prozesse zu bewerten (vgl. Zschieschang. 2013, S. 120).



---

Im Rahmen des in dieser Arbeit entwickelten Prozessmodells, kann die LCA als Mittel zur Bewertung verschiedener Technologien genutzt werden. Die Vorteile der LCA sind zahlreich. Die LCA ist die bisher am häufigsten eingesetzte Methode und besitzt große Bekanntheit. Sie definiert ein Vorgehen, mit dem Unternehmen Technologien oder Produktdesigns vergleichen und bewerten können. Sie ist normiert und baut auf standardisierten Begriffen und Definitionen auf und ist einfach in der Handhabung. Es gibt jedoch auch andere Modelle zur Umsetzung von Nachhaltigkeitspotenzialen, die für den Einsatz im SIA-DT Prozess infrage kommen, wie die Sustainability QFD (Sustainability Quality Function Deployment), für die eine weniger umfangreiche Datenbasis notwendig ist.

### 2.5.3 Sustainability Quality Function Deployment

In dieser Arbeit werden immer wieder Parallelen von Nachhaltigkeit und Qualität aufgezeigt (s. Kapitel 2.3.1, 2.3.2, 2.3.6). Die Norm DIN EN ISO 14001 spielt diesbezüglich eine große Rolle, da sie das übergeordnete Managementsystem bildet, in dem der SIA-DT Prozess eingebettet ist. Die Norm DIN EN ISO 14001, welche die Anforderungen an ein UMS beschreibt, baut in vielerlei Hinsicht auf der bekannten Norm DIN EN ISO 9001 auf. Nachvollziehbar ist, dass in der jüngeren Literatur zur Nachhaltigkeit, immer häufiger Methoden zum Einsatz kommen, die ursprünglich aus dem Werkzeugkasten des Qualitätsmanagement stammen (vgl. Al-Aomar. 2019, S. 1; Al-Bahi et al. 2021, S. 21; Siwiec et al. 2023, S. 1). Die aus dem Qualitätsmanagement stammende Conjoint Analyse ist bspw. ein wichtiges Werkzeug zum Management des Einsatzes von natürlichen Ressourcen im Unternehmen (vgl. Alriksson und Oberg. 2008, S. 253). Neben der Conjoint Analyse ist auch die Sustainability Quality Function Deployment Methode (SQFD), auch Green-QFD genannt, eine wichtige Methode in der Bewertung von Nachhaltigkeit (vgl. Al-Aomar. 2019, S. 2).

Qualität ist eng mit Nachhaltigkeit verknüpft. Durch die optimale Erfüllung von Kundenanforderungen oder der Voice of the Customer (deutsch: Stimme des Kunden), werden Faktoren wie Verschwendung, Abfall und Nacharbeit vermieden, welche andernfalls auf die Umwelt wirken. Die QFD integriert daher schon immer einen Teilaspekt der ökologischen Nachhaltigkeit. Mit geeigneten Anpassungen kann die Methode noch besser auf die Nachhaltigkeitsdefinition der TBL angepasst werden (vgl. Al-Aomar. 2019, S. 1). Die Methode der CE-QFD (Circular Economy QFD), einer anderen Variante der QFD die sich stärker der ökologischen Nachhaltigkeit widmet, trägt entscheidend zur nachhaltigen Entwicklung von Unternehmen bei (vgl. Siwiec et al. 2023, S. 17). Wie bereits eingeführt, spielen für KMUs die oftmals limitierten Ressourcen bei der Erreichung von Nachhaltigkeit eine große Rolle. Hier bietet die SFD neben der LCA eine gute Hilfestellung an. Mithilfe der SQFD können diejenigen Aktionen ermittelt werden, die den größten Einfluss auf die wichtigsten Nachhaltigkeitsperspektiven der Stakeholder besitzen. Außerdem ist das Werkzeug der QFD weitgehend bekannt und kann schnell und mit wenig Aufwand für den Zweck der Nachhaltigkeitsbetrachtung adaptiert werden. (vgl. Hsu et al. 2017, S. 629) Da KMUs (gerade im deutschen Markt) eine hohe gesamtwirtschaftliche Bedeutung besitzen, sind sie auch in der nachhaltigen Transformation von großer Bedeutung. (vgl. Hsu et al. 2017, S. 642).

Um Nachhaltigkeit im sogenannten Design-for-Quality Ansatz zu integrieren, muss eine langanhaltende Qualität, bspw. durch Haltbarkeit und Belastbarkeit, erreicht werden. Diese Qualität muss erzielt werden, ohne das hierfür seltene Ressourcen vollständig verbraucht werden oder große Mengen Abfälle entstehen

---

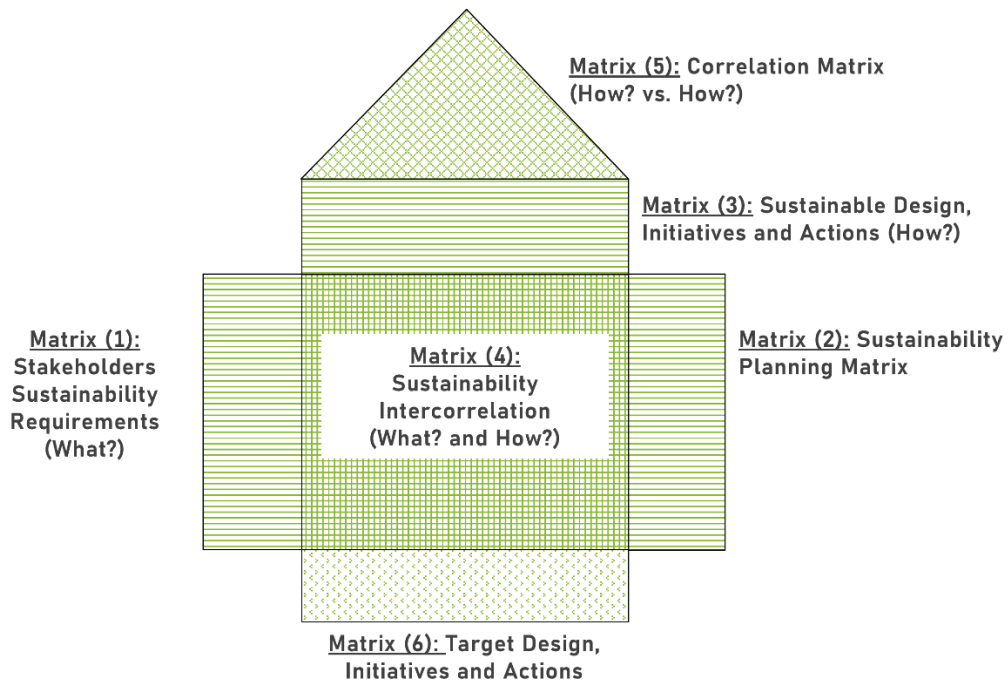
(vgl. Al-Aomar. 2019, S. 1). Die sogenannte SFD oder auch S[Q]FD (Sustainability [Quality] Function Deployment) ist eine nachhaltigkeitsorientierte Variante der QFD. Während die QFD bei der Integration von Qualität in der Produkt-Designphase oder bei der Auswahl von Technologien und Features genutzt wird, kann die Sustainability QFD für die Integration von Nachhaltigkeit in der Produktplanung und der Technologiebewertung genutzt werden (vgl. Al-Aomar. 2019, S. 1). Die aktuelle Forschung beschreibt, dass Nachhaltigkeit eine Systemeigenschaft ist (vgl. Al-Aomar. 2019, S. 2). Mit der Betrachtung von Nachhaltigkeit als Systemeigenschaft ist der Gedanke verbunden, dass sich die Nachhaltigkeit von Systemen wie Produkten, Technologien oder Prozessen durch geeignete Maßnahmen verbessern lässt. Zur Integration der Nachhaltigkeit in die QFD wird die TBL genutzt. Begründbar ist der Einsatz der SQFD, da für die kurzfristige Erreichung der Nachhaltigkeit in Unternehmen, das System Design einen großen Einfluss besitzt. Produkte werden in einer Art und Weise entwickelt, die negative Einflüsse in den drei Dimensionen der TBL minimiert. Für die längerfristige Sicherung und Optimierung der Nachhaltigkeit müssen holistische Nachhaltigkeitszielsysteme und -konzepte wie die CE integriert werden (vgl. Al-Aomar. 2019, S. 1). Einige Ansätze wie die CE-QFD sind bereits entwickelt und einsetzbar.

Das House of Quality, das im Kern der QFD steht, wird bei der SQFD zum HoS (House of Sustainability) umgebaut (vgl. Al-Aomar. 2019, S. 2). In der Abbildung 12 ist zu sehen, wie das House of Sustainability aufgebaut ist. Das HoS ist dabei eine strukturierte Darstellung und Integration einzelner Bewertungs- und Managementschritte. Es besteht aus sechs Matrizen, in denen die Ergebnisse des jeweiligen Bewertungsschritts in numerischer Form aufgeführt werden. Das gesamte HoS folgt einem quantitativen Ansatz.

Zunächst werden die Anforderungen und Prioritäten der Stakeholder an Nachhaltigkeitsaspekte des betrachteten Systems numerisch bewertet (1). In einer zweiten Matrix werden Maßnahmen geplant, um die Anforderungen umzusetzen (2). Es folgen Designvorschläge bzw. konkrete Aktionen und Initiativen zur Erreichung der geforderten Systemnachhaltigkeit (3). Im vierten Schritt wird die Interkorrelation zwischen den geplanten Initiativen zu Erreichung der Nachhaltigkeit und den Anforderungen an die Nachhaltigkeitsaspekte ermittelt. So kann sichergestellt werden, dass diejenigen Initiativen, die zu den höchst gewichteten Anforderungen führen, das höchste Gewicht im Entscheidungsprozess erhalten (4). Im fünften Schritt wird die Korrelation zwischen den definierten Initiativen (konkrete Maßnahmen) ermittelt. Es wird versucht die optimale Synergie zwischen Initiativen zu erzielen (5). Im letzten Schritt werden die höchst gewichteten Initiativen, die zur Erreichung der Nachhaltigkeitsaspekte durchgeführt werden müssen, ausgewählt (6).

Das HoS eignet sich besonders gut für die technische Auslegung von Produkten und für Entscheidungsträger bei der Auswahl von Eigenschaften, Technologien oder Features für Prozesse und Produkte. Mit dem HoS Ansatz kann ein Set aus Aktionen definiert werden, die prioritär sind für die Erreichung der Stakeholder Anforderungen an die Nachhaltigkeit (vgl. Al-Aomar. 2019, S. 2–3). Für eine detailliertere Beschreibung der Arbeitsschritte, kann die Arbeit von Siwiec et al. betrachtet werden, in der die Schritte als Flussdiagramm ausführlicher dargestellt und beschrieben sind (vgl. Siwiec et al. 2023, S. 8). Die exemplarische Ansicht einer ausgefüllten QFD ist in Anhang 6 zu sehen.

**Abbildung 12:** Schematischer Aufbau einer SQFD



Quelle: Eigenerstellung in Anlehnung an Al-Aomar. 2019, S. 6; Al-Aomar. 2019, S. 3; Hsu et al. 2017, S. 634

## 2.6 Nachhaltigkeit in Digitalisierungskonzepten

Studien belegen statistisch, dass die Implementierung des Industrie 4.0 Konzepts, das einen großen Schwerpunkt auf den Einsatz digitaler Technologien in der Produktion legt, die Erreichung der SDGs positiv beeinflusst. Es ist erkennbar, dass digitale Technologien nicht nur als besonders bedeutsam für die Nachhaltigkeitstransformation wahrgenommen werden, sondern die Transformation tatsächlich statistisch signifikant vorantreiben (vgl. Hung und Chen. 2023, S. 14).

Auch bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Interviews, wurde dies von den Interview-Teilnehmenden bestätigt. Details zu den Interviews sind in Kapitel 5 gezeigt. Neben Fragen zur Evaluation des SIA-DT Prozessmodells, wurden einigen Interview-Teilnehmenden Fragen zur Einschätzung der Wirkung digitaler Technologien auf die Nachhaltigkeitserrreichung gestellt. Alle Personen, die hierzu befragt wurden, beschrieben den Einfluss der digitalen Technologien als besonders bedeutend.

Experte/Expertin 1 beschrieb im geführten Interview, dass die digitalen Technologien ein Gamechanger sind, die zukünftig neben der Nachhaltigkeitsverbesserung auch zu weiteren Verbesserungen der Leistung in vielen Bereichen der Produktion führen wird (vgl. Anhang 8, S1.1). Experte/Expertin 3 beschrieb im Interview, dass beide Themengebiete neu in der Industrie sind. Große Synergieeffekte können erreicht werden, wenn Digitalisierung und die Nachhaltigkeitstransformation integriert werden. Die digitalen Technologien sind ein neuer Werkzeug-Satz mit denen zahlreiche Möglichkeiten zur Optimierung der Produktion bestehen, so Experte/Expertin 3. Dieser neuer Werkzeug-Satz wird für die Beantwortung von Nachhaltigkeitsfragen und für das Lösen von Problemen im Kontext der Nachhaltigkeit genutzt (vgl.

---

Anhang 10, S1.1). Experte/Expertin 4 beschreibt, dass Nachhaltigkeit und Digitalisierung eine Gesamtaufgabe für das Unternehmen bilden. Diese Aufgabe muss auf die Management-Ebene gehoben werden und erfordert eine interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Bereichen wie der Konstruktion, der Fertigungssteuerung, den Prozessverantwortlichen und dem Bereich der Data Science (vgl. Anhang 11, SY1).

In den Ergebnissen der Experten/Expertinnen-Interviews zeigt sich, dass die digitalen Technologien auch von den interviewten Personen, die in der Industrie oder der Forschung arbeiten, als bedeutend für die Erreichung von Nachhaltigkeit angesehen werden. Viele Studien, die die Bedeutung von digitalen Technologien für die Erreichung von Nachhaltigkeitszielen in der Industrie untersuchen, stammen nicht aus Deutschland. Da alle interviewten Personen an Forschungs- oder Industrie-Standorten innerhalb Deutschlands arbeiten, wird davon ausgegangen, dass die Bedeutung der digitalen Technologien für die Erreichung von Nachhaltigkeit in deutschen Unternehmen ebenso hoch eingestuft werden kann, wie an ausländischen Unternehmen bereits statistisch belegt ist. Im Folgenden werden die bestehenden Digitalisierungskonzepte Industrie 4.0 und Industrie 5.0 vorgestellt. Dabei wird untersucht, welche Bedeutung der sozialen und ökologischen Nachhaltigkeitsdimension in den Digitalisierungskonzepten zukommt. Die Unterschiede zwischen dem bekannten Industrie 4.0 Konzept und dem neuen Industrie 5.0 Konzept werden herausgearbeitet werden. Es wird gezeigt, wie die Konzepte die Dimensionen der Nachhaltigkeit integrieren und welche Schwerpunkte die Konzepte bei der Nutzung von digitalen Technologien legen.

Es werden Bereiche in der Produktion vorgestellt, die von den Interview-Teilnehmenden als Treiber für die Erreichung von Nachhaltigkeit beschrieben werden (auch Stellhebel genannt). Gleichermaßen werden aktuelle Anwendungsfälle von digitalen Technologien zur Erreichung von Nachhaltigkeit in der Produktion vorgestellt. Ziel ist es zu zeigen, wie digitale Technologien schon heute eingesetzt werden, um Nachhaltigkeit zu verbessern.

### **2.6.1 Industrie 4.0**

Vier Revolutionen der Industrie sind bekannt. Die vierte industrielle Revolution, auch Industrie 4.0 genannt, definiert das Konzept zur Integration neuer, insbesondere digitaler Technologien wie z. B. Sensoren und neuen Kommunikationsstandards wie Open Platform Communications Unified Architecture (OPC-UA). Eine Kommunikation zwischen den Maschinen und den Produkten, ist die Basis für vernetzte industrielle Prozesse. Diese Prozesse bieten eingesetzt in der Produktion, ein hohes ökonomisches Potenzial und können die Nachhaltigkeit in der Industrie verbessern (vgl. Sarikaya et al. 2021, S. 2). Im Jahr 2013 wurde das Industrie 4.0 Konzept stark auf das Thema Internet of Things (IoT) fokussiert. Der Ursprungsgedanke der Industrie 4.0 schloss auch die Umwelt und das soziale Umfeld mit ein. Das Industrie 4.0 Konzept entwickelte sich jedoch mit der Zeit, zu einem reinen Digitalisierungsrahmenwerk, und wird heute als solches verstanden (vgl. Breque et al. 2021, S. 8).

Das Industrie 4.0 Konzept besitzt Schwächen, von denen einige mit dieser Arbeit untersucht und aufgegriffen werden. Eine grundlegende Schwäche des Industrie 4.0 Konzepts liegt im Design der Potenzialbewertung von Technologien. Die Berücksichtigung der Nachhaltigkeitspotenziale kommt zu kurz. Außerdem fehlt die Bewertung von Leistungsbereichen die sicherstellen, dass ein interdisziplinärer systematischer Transformationsprozess der Industrie erreicht wird und der Ressourceneinsatz für die

---

Digitalisierung nicht zu Schäden an der Umwelt, Klimaveränderung und Förderung von sozialem Ungleichgewicht führt (vgl. Renda et al. 2022, S. 5). Der SIA-DT Prozess schafft einen Managementansatz mit denen das Industrieunternehmen Ressourcen besser allokalieren kann. Unternehmen, die das Industrie 4.0 Konzept einführen, stellen durch ein systematisches, im SIA-DT Prozessmodell abgebildetes Vorgehen sicher, dass ein Ressourceneinsatz für die Digitalisierungsinitiativen auch positiv auf operative und strategische Nachhaltigkeitsziele wirkt. Diese Nachhaltigkeitsziele sind im SIA-DT Prozess für bestimmte Prozessphasen und in bestimmten Gates entscheidend.

Die Europäische Kommission kritisiert, dass durch die rasante Zunahme an globalen Lieferketten und der Vernetzung zu globalen Wertschöpfungsnetzwerken die globale Wohlfahrt erhöht wird, lokale Ungleichheiten jedoch genauso stark gefördert werden. Globale Wertschöpfungsnetzwerke sind fragiler und anfälliger, insbesondere in globalen Krisen, wie bspw. die COVID-19 (Coronavirus SARS-CoV-2) Pandemie zeigte. Auch der Verbrauch und die Verschwendung natürlicher Ressourcen hat in den letzten Jahren zugenommen. Gleichzeitig bieten die digitalen Technologien, die für das starke Wachstum der Unternehmen verantwortlich sind, auch die Möglichkeit die Ressourceneffizienz zu erhöhen, die Produktivität zu steigern und verbesserte Arbeitsumgebungen zu schaffen (vgl. Breque et al. 2021, S. 10).

Das Konzept der Industrie 4.0 wurde in der vergangenen Dekade vor allem als Leitfaden und Zielbild zur Digitalisierung in der Industrie genutzt. Im Vordergrund stand die technologische Transformation der Industrie rund um Künstliche Intelligenz und Cyber-Physischen Systemen (CPS). Dieses Framework ist heute nicht mehr geeignet, da es nicht auf den Kontext der Klimakrise und die sozialen Spannungen ausgelegt ist. Dennoch bietet das Industrie 4.0 Konzept einen guten Ausgangspunkt, da das Konzept zur Optimierung von Geschäftsmodellen und zu einer neuen ökonomischen Denkweise auffordert, welches zur Lösung der Klimakrise beiträgt (vgl. Renda et al. 2022, S. 5).

Auch auf umweltbezogene Risiken wirkt der Einsatz von Industrie 4.0 Technologien positiv. Die Industrie findet sich heute in einem volatilen, unsicheren, komplexen und vielseitigem Marktumfeld wieder, welches in der Literatur als VUCA (Volatile, Uncertain, Complex, Ambiguous) abgekürzt wird. Industrie 4.0 hilft Industrieunternehmen nicht nur bei der Verbesserung der Qualität oder Senkung der Kosten und Zeit, sondern kann auch Risiken, die mit dem VUCA-Marktumfeld der Unternehmen verbunden sind, reduzieren. Die vom Weltwirtschaftsforum definierten Risikobereiche der wirtschaftlichen, ökologischen, geopolitischen, sozialen und technologischen Risiken, zeigen eine Verringerung des Risikopotenzials durch den Einsatz von Industrie 4.0 Technologien im Unternehmen (vgl. Ocicka et al. 2022, S. 728). Viele kürzlich veröffentlichte wissenschaftliche und institutionelle Publikationen wie wissenschaftliche Artikel und Berichte, geben Empfehlungen wie das Konzept Industrie 4.0 zu einem holistischen Konzept weiterentwickelt werden kann. Dabei wird das Konzept neu ausgerichtet, um ökologische, ökonomische und soziale Nachhaltigkeit zu erreichen (vgl. Fuertes et al. 2022, S. 28). Dieses erweiterte Digitalisierungskonzept wird unter dem Namen Industrie 5.0 adressiert.

Drei Bereiche, in denen der Fokus des Technologieeinsatzes angepasst werden muss, um aktuellen Herausforderungen zu begegnen, sind in der Forschung identifiziert. Diese sind in der nachfolgend dargestellten Tabelle 5 aufgelistet. Regenerative sowie soziale und Umwelttechnologien müssen mit einem Fokus der Verbesserung der Nachhaltigkeitsziele in den drei Nachhaltigkeitssäulen (Three Pillars of Sustainability, Triple Bottom Line), gezielt eingesetzt werden (vgl. Renda et al. 2022, S. 5). Die aktuelle Forschung

führt keine Managementprozesse ein, mit denen ein gezieltes reproduzierbares Vorgehen zur Implementierung digitaler Technologien für die Erreichung von Nachhaltigkeit ermöglicht wird. In diesem Punkt wird diese Arbeit die aktuelle Forschung ergänzen.

**Tabelle 5:** Empfehlungen der Europäischen Kommission zur Adjustierung des Industrie 4.0 Konzepts

<b>Regenerative technologies</b>	Embrace technologies for circular economy and positive restorative feedback loops. Use sustainable technologies as key pillar of the design of entire value chains.
<b>Social technologies</b>	Focus on technologies that increase the wellbeing of workers and social inclusion. Make use of technologies that do not substitute but complement human capabilities whenever possible.
<b>Environmental technologies</b>	Implement technologies that eliminate the use of fossil fuels and promote energy efficiency. Technologies should be used as an enabler that crafts new ways of thriving in respectful interdependence with natural systems.

Quelle: Eigenerstellung in Anlehnung an Renda et al. 2022, S. 5

## 2.6.2 Industrie 5.0

Dass die Nachhaltigkeitstransformation von Unternehmen zu einer neuen industriellen Revolution der Industrie führen könnte, beschreibt auch der Ernst & Young (EY) Berater Huber. So gibt Huber an, dass seit dem Weltwirtschaftsforum in Davos, die Nachhaltigkeitstransformation in vielen Unternehmen in den Vordergrund rückt und sich rasant beschleunigt (vgl. Huber. 2021). Der Gründer des Forums selbst, verfasste zwei Bücher über den fundamentalen Wandel der Industrie durch Digitalisierung (vgl. Breque et al. 2021, S. 8).

Die Europäische Kommission widerspricht Huber. Da Industrie 5.0 keinen durch Technologien hervorgerufenen Paradigmenwechsel beschreibt, sollte das Industrie 5.0 Konzept komplementär zum Konzept Industrie 4.0 betrachtet werden. Somit wäre die Nachhaltigkeitstransformation keine eigenständige Evolutionsstufe der Industrie (vgl. Bendig et al. 2021, S. 22). Die Wurzeln des Industrie 5.0 Konzept stammen aus dem Grundgedanken des Industrie 4.0 Konzeptes, das 2011 als Teil der High-Tech Strategie der Bundesrepublik Deutschland vorgestellt wurde. Industrie 4.0 wurde danach schnell in der Wirtschaft, Wissenschaft und bei Entscheidungsträgern aufgenommen (vgl. Breque et al. 2021, S. 8). Ähnliche Erwartungen werden nun an das Konzept der Industrie 5.0 gestellt.

In Bezug auf den Technologieeinsatz folgt Industrie 5.0 dem Gedanken, das durch digitale Technologien wie bspw. Big Data und KI neue Anforderungen gemeistert werden, die im Zuge der Nachhaltigkeitstransformation aufkommen. Dies können erhöhte Voraussetzungen an die Produktionsflexibilität sein, aber auch schnellere Entwicklungszyklen bei geringerem Ressourceneinsatz; die Schaffung robuster Wertschöpfungsketten und -netzwerke, sowie der Entwicklung zirkulärer Geschäftsmodelle und Prozesse (vgl. Breque et al. 2021, S. 11).

Die Umsetzung von Industrie 5.0 in Unternehmen muss Hürden überwinden, die insbesondere in Bezug zur Nachhaltigkeit stehen. Wichtige Barrieren sind die Diskrepanzen zwischen technologischem und sozialem Wandel in Unternehmen, dem Mangel an nachhaltigen Initiativen bei der Umsetzung von Industrie 5.0 und der Standardisierung der Infrastruktur (vgl. Sharma et al. 2022, S. 6).

Die Forschung schlägt Ansätze zur Überwindung der Barrieren vor. Es wird bspw. empfohlen, bei der Implementierung neuer Technologien dem 6R-Ansatz zu folgen. Ebenfalls muss in Unternehmen ein Fokus auf Environmental Product Design und die LCA gelegt werden. Ein nachhaltiges Management von Ressourcen und die systematische Umsetzung von industriellen Umweltschutzinitiativen (hierzu zählt auch CE) muss vorangetrieben werden. Eine transparente Kommunikation über die Initiativen, möglichst End-to-End, muss erreicht werden (vgl. Sharma et al. 2022, S. 7). Die Tabelle 6 zeigt zusammenfassend die wichtigsten Unterschiede zwischen Industrie 4.0 und Industrie 5.0.

**Tabelle 6:** Unterschiede von Industrie 4.0 und Industrie 5.0

Industry 4.0	Industry 5.0
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Centred around enhanced efficiency through digital connectivity and artificial intelligence</li> <li>• Technology centred around the emergence of cyber-physical objectives</li> <li>• Aligned with optimization of business models within existing capital market dynamics and economic models – i.e., ultimately directed at minimization of costs and maximization of profit for shareholders</li> <li>• No focus on design and performance dimensions essential for systemic transformation and decoupling of resource and material use from negative environmental, climate and social impacts</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ensures a framework for industry that combines competitiveness and sustainability, allowing industry to realize its potential as one of the pillars of transformation</li> <li>• Emphasizes impact of alternative modes of (technology) governance for sustainability and resilience</li> <li>• Empowers workers through the use of digital devices, endorsing a human-centric approach to technology</li> <li>• Builds transition pathways towards environmentally sustainable uses of technology</li> <li>• Expands the remit of corporation’s responsibility to their whole value chains</li> <li>• Introduces indicators that show, for each industrial ecosystem, the progress achieved on the path to well-being, resilience, and overall sustainability</li> </ul>

Quelle: Renda et al. 2022, S. 6–7

Während der Fokus von Industrie 4.0 klar auf der technologischen Transformation von Industrieunternehmen liegt, wird mit dem Konzept Industrie 5.0 eine nachhaltigkeitsorientierte Anpassung des Konzeptes durchgeführt. Hierbei sind nicht nur wirtschaftliche, qualitative oder zeitbezogene Ziele durch Technologien zu erfüllen, sondern insbesondere die Erreichung von ökologischer, ökonomischer und sozialer Nachhaltigkeit wichtig. Das Industrie 4.0 Konzept wird im Industrie 5.0 Konzept um die individualisierte Mensch-Maschine-Interaktion; bioinspirierte Technologien und intelligente Werkstoffe; digitale Zwillinge

---

und Simulation; Datenübertragungs-, Speicher- und Analysetechnologien von Nachhaltigkeitsdaten sowie Technologien für Energieeffizienz erweitert (vgl. Breque et al. 2021, S. 7).

Obwohl das Industrie 5.0 Konzept ein um Nachhaltigkeit ergänztes Industrie 4.0 Konzept darstellt, fehlen in der Forschung bisher konkrete Prozessmodelle für das systematische Vorgehen bei der nachhaltigkeitszielbezogenen Digitalisierung. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Prozessmodell bildet ein solches systematisches Vorgehen. Das Prozessmodell steht Unternehmen als nachvollziehbarer Leitfaden für die nachhaltigkeitszielorientierte Digitalisierung zur Verfügung.

## **2.7 Stellhebel, Fokusbereiche und Anwendungsfälle**

Die nachfolgenden Unterkapitel 2.7.1 und 2.7.2 beschäftigen sich mit den Bereichen in produzierenden Unternehmen, die von den Teilnehmenden der durchgeführten Experten/Expertinnen-Interviews, als besonders wichtig für den Einsatz von digitalen Technologien beschrieben werden. Die Experten/Expertinnen wurden zu den aktuell wichtigsten Bereichen und Prozessen für die Erreichung von Nachhaltigkeitszielen befragt. Die Antworten der Teilnehmenden sind im Folgenden vorgestellt.

Neben der wissenschaftlichen Evidenz für den Wert einzelner Technologien für die Nachhaltigkeitserreichung (s. Kapitel 2.7.3) werden die Antworten der Interview-Teilnehmenden verwendet, um weitere Erkenntnisse zu aktuellen Anwendungsfällen zu gewinnen. Ausgewählten Teilnehmenden, die sich mit dem Management der Digitalisierung in der Produktion befassen, wurden die Fragen C1-3 und die Fragen S1.1-3.4 gestellt (vgl. Anhang 7; Tabelle 13).

### **2.7.1 Wichtige Bereiche für die Implementierung digitaler Technologien**

In Frage S1.2 wurden die Experten/Expertinnen gefragt, in welchen Bereichen der Produktion der Einsatz von digitalen Technologien besonders wichtig ist (vgl. Anhang 7, S1.2). Experte/Expertin 1 erklärt im Interview, dass einige Bereiche im Unternehmen und in der Produktion von digitalen Technologien stärker profitieren als andere Bereiche. Die bedeutendsten Bereiche sind diejenigen, bei denen ein hoher Energieeinsatz aufgebracht werden muss. Da Experte/Expertin 1 in einem Unternehmen aus der Lebensmittelindustrie tätig ist, sind in diesem Fall Gefriertrocknungs- und Verdampfungsprozesse wichtige Treiber. Auch der Energieverbrauch durch Gebäude und Anlagen sind ein wichtiger Treiber, wenn es um die Optimierung der Nachhaltigkeit geht. Anlagen, wie bspw. Kompressoren, die über ein Wochenende eingeschaltet bleiben und dadurch Energie verbrauchen, könnten besser gesteuert werden. Mit intelligenten Technologien wie KI können solche Potenziale identifiziert und entsprechende Geräte schneller und effizienter gesteuert und ggf. intelligent abgestellt werden (vgl. Anhang 8, S1.2). Im Bereich der Projekte für die Optimierung der Energienutzung ist das Unternehmen in dem Experte/Expertin 1 tätig ist, im Vergleich zur Optimierung anderer Bereiche, weiter vorangeschritten (vgl. Anhang 8, SY6).

Auch Experte/Expertin 3 erklärt, dass mit den digitalen Technologien neue Möglichkeiten zur Optimierung von Prozessen entstehen. Prozesse können bspw. durch den Einsatz von IoT in der Produktion noch besser optimiert werden, indem mehr Daten über die Prozesse gesammelt werden können. Auch für die Beantwortung von Nachhaltigkeitsfragen und für das Lösen von Problemen, die im Zuge der



---

Nachhaltigkeitstransformation auftreten, können die digitalen Technologien genutzt werden, so Experte/Expertin 3 (vgl. Anhang 10, S1.1, S1.2).

Im Unternehmen in dem Experte/Expertin 1 beschäftigt ist, können durch intelligente Anlagensteuerungen große Energiemengen eingespart werden. Ein weiterer wichtiger Stellhebel ist die Reduktion der Komplexität von Prozessen durch Assistenzsysteme für die Shop-Floor Fachkräfte. Durch diese Assistenzsysteme kann die Komplexität einiger Aufgaben in der Produktion stark reduziert werden und Nachhaltigkeitspotenziale, durch ein besseres Verständnis für die Prozesse, leichter identifiziert und realisiert werden (vgl. Anhang 8, S1.2). Experte/Expertin 3 gibt an, dass es grundsätzlich sinnvoll ist digitale Technologien dort als erstes zu pilotieren, wo der Hauptanteil der Wertschöpfung stattfindet. In diesen Bereichen müssen neue Technologien als Erstes implementiert werden. Das Unternehmen in dem Experte/Expertin 3 tätig ist, setzt digitale Technologien in der Zerspanung und anderen besonders wertschöpfenden Prozessen ein (vgl. Anhang 10, S1.1, S1.2). Für die Identifikation von besonders wertschöpfenden Prozessen wird auf Kapitel 4.1.2 verwiesen.

### **2.7.2 Stellhebel für die Erreichung von Nachhaltigkeitszielen**

Um zu ermitteln in welchen Bereichen in Industrieunternehmen ein besonders hoher Nutzen aus der Implementierung von digitalen Technologien hervorgeht, wurden Experten/Expertinnen gefragt, welche wichtigen Stellhebel für die Erreichung von Nachhaltigkeitszielen in Industrieunternehmen bestehen.

Experte/Expertin 1 beschreibt, dass die Nutzung der Daten, die im Produktionsumfeld anfallen, den größten Wert bei der Nachhaltigkeitstransformation erbringen. Das Unternehmen, in dem Experte/Expertin 1 tätig ist, implementierte hierzu bereits ein Digital Backbone oder auch Digital Factory Backbone (deutsch: Digitales Rückenmark). Dieses Informationssystem wird genutzt, um Daten aus Steuerungen und Sensorik einzusammeln und die Daten in Echtzeit global verfügbar zu machen. Die Datenplattform erlaubt dem Unternehmen in Echtzeit einzusehen, was an verschiedenen Standorten geschieht. Die Daten können bis auf einzelne Anlagen disaggregiert werden. Die Datenplattform legt, so Experte/Expertin 1, den Grundstein für alle weiteren Verbesserungsprojekte. Auch für Projekte zur Erreichung und Verbesserung von Nachhaltigkeitszielen. Mit den Daten können Fragen zu Energieverbräuchen, Abfallproduktion und zur Verbesserung der alltäglichen Arbeit der Mitarbeitenden beantwortet werden (vgl. Anhang 8, S1.3). Die Energiekosten für den Fertigungsstandort Deutschland werden auch von Experte/Expertin 3 als wesentlicher Stellhebel zur Erreichung von Nachhaltigkeit beschrieben. Auch die Medienversorgung (bspw. Kühlschmierstoffe, Öl-Kreislauf) und Druckluft-Versorgung sind wichtige Treiber. Experte/Expertin 3 beschreibt, dass auch die Effizienz der Infrastruktur bzw. dem Anlagenpark ein Faktor ist, den es zu berücksichtigen gilt. Im Unternehmen in dem Experte/Expertin 3 arbeitet, sind auch sogenannte Prozessgase ein wichtiges Thema. Neben der Medienversorgung sind zudem die eigentlichen Rohstoff-Verbräuche, zu optimieren, wenn die Nachhaltigkeit gesteigert werden soll (vgl. Anhang 10, S1.3).

Neben den Aussagen der Interviewteilnehmenden wird in dieser Arbeit weitere Evidenz bereitgestellt, dass Daten einen wesentlichen Stellhebel für die Erreichung von Nachhaltigkeitszielen bilden (s. Kapitel 2.6). Experte/Expertin 1 beschreibt, dass auch die optimale Auswahl von Fertigungsverfahren auf Grundlage der Daten durchgeführt wird. Verfahren mit möglichst geringem Carbon Footprint und möglichst guter ökonomischer Leistung, wie hoher Qualität und geringen Kosten, können so ausgewählt werden.

---

Experte/Expertin 1 beschreibt das ein Ziel des Unternehmens darin besteht, für jeden Liter, der produziert wird, Werte wie den CF nachverfolgen zu können. Die Digitalisierung der Prozesse wird die Leistung in der Produktion verbessern. Digitale Technologien wie Künstliche Intelligenz in der Produktion, digitale Checklisten und weitere datengetriebene Technologien sind dabei von entscheidender Bedeutung. Der erste wichtige Stellhebel sind die Daten (vgl. Anhang 8, S1.3). Auch Experte/Expertin 3 schätzt die Produktionsdaten als wichtigen Stellhebel für die Erreichung von Nachhaltigkeit ein. Insbesondere die Vernetzung der Anlagen untereinander und mit den unterstützenden IT-Systemen wie MES und ERP bildet einen wichtigen Stellhebel. Experte/Expertin 3 beschreibt das 3D-Druck und Augmented Reality bereits im Unternehmen eingesetzt werden. Machine Learning und KI werden allerdings noch nicht breit eingesetzt, so Experte/Expertin 3 (vgl. Anhang 10, S2).

Experte/Expertin 1 schätzt die Robotik als zweiten großen Stellhebel ein. Der Einsatz der Robotik in der Produktion ermöglicht eine gleichbleibend hohe Qualität und eine Unterstützung des Shop-floor Personals. Auch das Thema Schutz der Mitarbeitenden und die Bewegung von Mitarbeitenden von repetitiven oder nicht wertschöpfenden Aufgaben zu Tätigkeiten mit hoher Wertschöpfung sind, so Experte/Expertin 1, wichtig (vgl. Anhang 8, S1.3).

Smart Execution Systeme (Assistenzsysteme), bspw. durch Smartwatches, spielen ebenfalls eine wichtige Rolle für die Erreichung von verbesserten und nachhaltigeren Prozessen (vgl. Anhang 8, S1.3). Augmented und Virtual Reality schätzt Experte/Expertin 1 als dritten wichtigen Stellhebel ein. Durch ein verbessertes Training des Personals durch AR und VR können Fehler vermieden werden. Das führt zu weniger Abfall. Eine gesteigerte Sensibilisierung für Energieverbräuche wird ebenfalls erzielt. Durch frühzeitiges Training kann die Produktion schneller anlaufen und der Time-to-Market verkürzt werden (vgl. Anhang 8, S1.3).

Experte/Expertin 1 fasst zusammen, dass es vier große Stellhebel für die Erreichung einer nachhaltigen und leistungsfähigen Produktion gibt: Produktionsdaten, Robotik, verbesserte Assistenzsysteme sowie AR und VR (vgl. Anhang 8, S1.3, C5).

### **2.7.3 Anwendungsfälle digitaler Technologien zur Nachhaltigkeitserreichung**

Digitale Technologien helfen Unternehmen dabei Abfall zu reduzieren, Energie einzusparen und ein besseres Recycling zu ermöglichen. Insbesondere IoT und Big Data Analytics sind hierzu von entscheidender Bedeutung (vgl. Akbari und Hopkins. 2022, S. 689). Digitale Technologien werden oftmals in Verbindung mit der Einführung des Konzepts Industrie 4.0 untersucht. Neben der Ermöglichung einer effizienten Produktion, führt die Integration von Industrie 4.0 und die Aufnahme der SDGs in die Steuerung der Unternehmen zur Erreichung einer nachhaltigen Transformation. Die Studie von Oláh et al. zeigt die Zusammenhänge zwischen der Nutzung von Industrie 4.0 Technologien und einzelnen SDGs (vgl. Oláh et al. 2020, S. 1). Die Digital-based Produktion ist ein integrierter Ansatz, digitale Technologien einzusetzen, um Produktionsprozesse zu überwachen, zu analysieren, zu verbessern und diese zu simulieren. Die Digital-based Production (digital gestützte Produktion) bringt eine Vielzahl an Chancen mit sich. Neben neuen Kommunikationsstandards und dem Einsatz disruptiver Technologien wie z. B. KI und IoT, ermöglicht die Digital-based Production auch neue Geschäftsmodelle (vgl. Metternich und Kreß. 2023, S. 179). Neben der Nutzung von Stammdaten (bspw. Maschinendaten) und Bewegungsdaten (bspw. Prozessdaten) sind digitale Technologien auch gleichzeitig Erzeuger von Daten, die für Nachhaltigkeitsbewertungen und das

---

Nachhaltigkeitsmanagement genutzt werden. Digitale Technologien sind der Schlüssel für die nachhaltige Transformation der produzierenden Industrie. Daten sind die Grundlage für das Identifizieren von Optimierungspotenzialen. Ein besseres Prozessverständnis ermöglicht ein höheres Maß an Agilität. Diese Agilität ist notwendig, um zukünftig auf Herausforderungen und Risiken im Unternehmensumfeld schneller zu reagieren (vgl. Peças et al. 2023, S. 1). Digitale Technologien nutzen die Daten, die im Produktionsumfeld erfasst werden, um Prozesse und Abläufe zu automatisieren, zu optimieren oder die Prozessfähigkeit von Produktionsprozessen zu erhöhen. Nachfolgend werden Anwendungsfälle digitaler Technologien für die Steigerung von Nachhaltigkeit in der Produktion aus der Literatur und den Angaben aus den Experten/Expertinnen-Interviews vorgestellt.

Ein digitaler Zwilling ist ein Werkzeug zur digitalen Planung, Überwachung und Steuerung der Produktion. Der Digitale Zwilling verwendet Daten, die durch CPS gesammelt werden, um Produktionsprozesse in Echtzeit zu verfolgen und diese im Digitalen Zwilling abzubilden. Der Digitale Zwilling wird zur Simulation von Abläufen und Prozessen in der Produktion genutzt. Dies ermöglicht eine effizientere Planung der Produktion, bevor Fertigungslinien in der realen Welt in Betrieb genommen werden. Der Digitale Zwilling kann auch genutzt werden, um Planungswerkzeuge und Analysewerkzeuge wie die VSM 4.0 (s. Kapitel 4.1.2) anzuwenden. Entscheidungsprozesse werden so besser mit Informationen unterstützt (vgl. Lu et al. 2021, S. 765).

KI ist im Umfeld der heutigen Produktion ein fester Bestandteil zur Erreichung von Kosten, Qualitäts- und Zeitzielen. Ein Beispiel für den Einsatz von maschinellem Lernen (englisch: Machine Learning, ML) ist die Analyse von Nutzungsdaten zu Werkzeugen, Standorten dieser Werkzeuge sowie dem aktuellen Werkzeugbestand. Auf diesen Daten aufbauend ermöglicht bspw. eine datenbasierte Wartungsstrategie Kosten zu senken und die Qualität der Produktionsprozesse zu erhöhen (vgl. Schreiber et al. 2023, S. 185). KI wird auch angewendet, um Stromverbräuche von Maschinen zu prognostizieren und eine intelligente Steuerung von Anlagen zu ermöglichen. So werden bspw. Leistungsspitzen reduziert. Auch der Energieeinkauf kann mit KI optimiert werden. Insgesamt führt der Einsatz von KI zu einer Reduzierung des Energieverbrauch (vgl. Metternich und Kreß. 2023, S. 180). Die Verbindung von KI mit Edge Computing ermöglicht Edge KI Anwendungen, die dezentralisierte Systeme zum Treffen intelligenter Entscheidungen befähigt (vgl. Chelliah et al. 2022, S. 148).

Durch die steigende Datenverfügbarkeit in der Produktion, wird die Entwicklung datenbasierter Geschäftsmodelle immer wichtiger. Auch im Rahmen der Nachhaltigkeitstransformation der Produktion sind diese wichtig. KI besitzt dabei eine Schlüsselbedeutung. Hoffmann et al. stellen einen morphologischen Kasten vor, der Unternehmen eine Hilfestellung für die Entwicklung von KI-basierten Geschäftsmodellen bietet (vgl. Hoffmann et al. 2022, S. 214). KI wird für viele bereits existierende digitale Lösungen in der Industrie eine wichtige Rolle bei der Erreichung noch besserer und höher gesteckter Ziele spielen. Experte/Expertin 1 beschreibt das Anwendungsbeispiel, dass 4 % Energieeinsparung innerhalb weniger Tage identifiziert, werden konnten, nachdem das Unternehmen in dem Experte/Expertin 1 tätig ist, eine industrielle Datenplattform in einigen Werken ausrollte. Diese Energieeinsparung trägt sowohl zur ökologischen als auch zur ökonomischen Nachhaltigkeitssteigerung des Unternehmens bei. Die Verbindung der Datenplattformen mit KI soll zukünftig zu noch besserer Leistung in den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit führen. Die Integration von KI in existierende industrielle Datenplattformen ermöglicht eine signifikante Verbesserung von Produktionsprozessen (vgl. Anhang 8, S1.3, C1). Experte/Expertin 4 beschreibt

---

einen KI-Anwendungsfall bei der Fertigung von Keramikteilen. Durch eine multikriterielle Optimierung kann die Bauteilqualität bei Verwendung alternativer Brennstoffe für die Erzeugung der Prozesswärme optimiert werden. Es wird eine hohe Bauteilqualität bei gleichzeitig nachhaltigeren Prozessen erreicht (vgl. Anhang 11, I8).

Auch die additive Fertigung (englisch: Additive Manufacturing, AM) besitzt eine besondere Bedeutung, da sie maßgebend für eine starke Erhöhung der Ressourceneffizienz ist. Gerade in Anbetracht der steigenden Regulierung des Nachhaltigkeitsbereichs der Ressourceneffizienz durch die EU, ist AM eine Schlüsseltechnologie der nachhaltigen Transformation (vgl. Bendig et al. 2021, S. 21). Auch die Ergebnisse der Autoren Bai et al. zeigen, dass die Additive Fertigung eine große Bedeutung für die nachhaltige Transformation hat (vgl. Bai et al. 2020, S. 10).

Der Einsatz von AM wirkt positiv in allen Dimensionen der Nachhaltigkeit. Durch Einsatz der AM Technologie werden bspw. Arbeitsunfälle reduziert, die bei alternativen Verfahren häufiger auftreten. Die ökologische Nachhaltigkeit wird durch AM positiv beeinflusst, da u. a. Ressourcenvierbräuche reduziert werden und weniger Wasser im Fertigungsprozess verwendet wird. Die Reduktion des Ressourcenverbrauchs wirkt positiv auf die ökonomische Nachhaltigkeitsdimension. Auch der Time-to-Market und die Effizienz der Produktion werden verbessert (vgl. Godina et al. 2020, S. 11–12). Wie bei den vorher genannten Technologien bringt die Verknüpfung von AM mit anderen Technologien den größten Mehrwert. Wird AM mit KI verknüpft, kann der AM-Arbeitsfluss optimiert werden. So wird KI bspw. zur Verbesserung der Bauteiltopologie verwendet. Gleichermaßen ermöglicht KI eine verbesserte Planung der Prozesse. Prozessparameter können bspw. so gewählt werden, dass die Prozesszeit optimiert wird. Auch die Prozesssteuerung und die Qualitätskontrolle, insbesondere die Detektion von Fehlern, wird verbessert (vgl. Sandeep et al. 2022, S. 35–36).

Die Robotik findet in der Industrie Einsatz, um ökonomische und insbesondere soziale Ziele zu erreichen. So erklärt Experte/Expertin 1, dass Roboterhunde eingesetzt werden um Mitarbeitende vor der Arbeit in Gefahrenbereichen, bspw. bei Inspektionsgängen in bestimmten Produktionsbereichen, zu schützen und um Mitarbeitende nicht für besonders anstrengende und stark repetitive Tätigkeiten einzusetzen. Insbesondere die Daten, die durch die Sensorik von Roboterhunden und anderen in der Produktion eingesetzten Robotern gewonnen werden, bringen in Verbindung mit KI zukünftig einen großen Wert. Die Robotik, insbesondere humanoide Roboter, sind laut Experte/Expertin 1 neben dem Einsatz von KI besonders wichtig für die Erreichung von Nachhaltigkeitszielen. Der Einsatz von Robotern bei Inspektionsrundgängen und Reinigungsarbeiten führt bereits heute zur Verbesserung der Arbeitsbedingungen der Mitarbeitenden (vgl. Anhang 8, S1.3, S2, S3.1, C1).

IoT unterstützt bei der Nachhaltigkeitstransformation der Industrie besonders durch die Ermöglichung digitalisierter Prozesse. Insbesondere für die vernetzte Produktion ist IoT ein wesentlicher Treiber und wird bspw. für die Ermöglichung von präventiver Wartung eingesetzt (vgl. Fraga-Lamas et al. 2021, S. 1). Die IoT Technologie ist für viele weitere Technologien entscheidend, da das IoT die Daten für andere Technologien wie KI bereitstellt (vgl. Chelliah et al. 2022, S. 148). Experte/Expertin 3 beschreibt einen kombinierten Anwendungsfall aus der Industrial IoT (IIoT) Technologie und ML. Durch die Implementierung eines ML-Modells auf Basis der Frequenzprofile von Ventilatoren an Sinteröfen, wird der Ausfall der Ventilatoren vorhergesagt. Da die Ventilatoren ein Gas in die Sinteröfen bewegen, welches die Wärme

---

schneller abtransportiert., wird im Fall des Ausfalls eines Ventilators im Abkühlprozess, die Abkühlung verlängert und Werkstücke können beschädigt werden. Das ML-Modell kann diese Ausfälle vorhersagen. Die kombinierte ML und IIoT Anwendung ermöglicht eine Reduzierung der Wartezeiten. Kosten für die Wartung können gesenkt werden und weniger Ressourcen wie Kühlmittel werden verbraucht. Auch die Beschädigung der Werkstücke durch ein zu langsames Abkühlen wird verhindert (vgl. Anhang 10, A1).

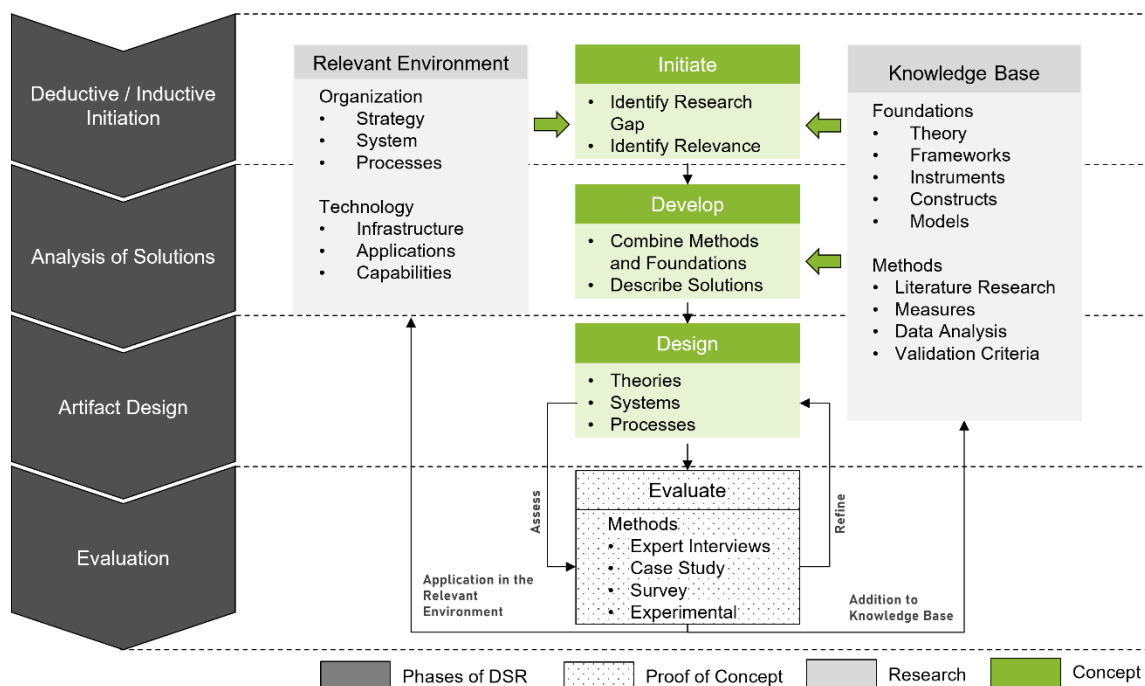
### 3 Forschungsmethodologie

Das Kapitel Forschungsmethodologie erläutert die Design Science Research Forschungsmethodologie. Dabei werden die Hintergründe sowie die Anwendungsgebiete der Methodologie beschrieben. Die Forschungsmethodologie wird grafisch vorgestellt. Aufbauend auf dieser Vorstellung wird die wissenschaftliche Vorgehensweise der Arbeit beschrieben. Es wird erklärt, wie die Arbeit die einzelnen Phasen der Forschungsmethodologie umsetzt, welche Forschungsmethoden in den einzelnen Phasen verwendet werden und welche Kapitel den einzelnen Phasen des Forschungsansatzes zuzuordnen sind.

#### 3.1 Design Science Research Methodologie

Die Forschungsmethodologie, die für die Erarbeitung des Themas genutzt wird, ist der Design Science Research Ansatz. Die Phasen und Schritte, die während der Forschungsmethodologie durchlaufen werden, sind in Abbildung 13 grafisch dargestellt und werden im Folgenden erläutert. Dieses Kapitel schafft Transparenz, wie der nachhaltigkeitsintegrierte Ansatz zur Nutzung von digitalen Technologien in der Industrie (englisch: Sustainability integrated approach for digital technologies, SIA-DT) methodisch erarbeitet wird und hat zum Ziel die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse zu verbessern.

Abbildung 13: DSR-Methodologie



Quelle: Eigenerstellung in Anlehnung an Hevner et al. 2004, S. 81; Koppenhagen et al. 2012, S. 6; Koppenhagen et al. 2012, S.

5.

Für die konzeptionelle Erstellung von Systemen und Prozessen wird in der Literatur oftmals die Forschungsmethodologie des Design Science Research (DSR) genannt. Methodologien beschreiben im

---

Allgemeinen die in der Wissenschaft angewendeten bzw. die innerhalb einer bestimmten Methodologie anzuwendenden Methoden. Eine Methodologie beschreibt ebenfalls, welches Vorgehen wissenschaftlich ist und welche Methoden innerhalb dieses wissenschaftlichen Vorgehens einzusetzen sind (vgl. Söllner, 2021, S. 13). Die DSR-Methodologie beschreibt wie mittels eines systematischen Einsatzes von verschiedenen Forschungsmethoden innerhalb von vier Phasen eine Problemstellung für die relevante Umgebung, bspw. ein produzierendes Unternehmen oder die produzierende Industrie, gelöst wird (vgl. vom Brocke et al. 2020, S. 1). „*Design activities are endemic in many professions. In particular, the engineering profession has produced a considerable literature on design.*“ (Hevner et al. 2004, S. 82) Aus dem Ingenieurwesen stammend, findet die DSR-Methodologie heute Anwendung in verschiedenen Disziplinen. Hauptsächlich wird sie genutzt um Artefakte zu konstruieren bzw. zu designen, die für die Gestaltung und die Implementierung von IT- und Managementsystemen sowie -prozessen genutzt werden (vgl. Hevner et al. 2004, S. 77).

Das Entwerfen und der Einsatz der Artefakte löst ein technisches oder organisatorisches Problem oder trägt zur Lösung des Problems bei (vgl. Seyfried et al. 2023, S. 52). Die DSR-Methodologie wurde insbesondere in den 60er und 70er Jahren bekannt und wird heute am häufigsten in den Sozial- und Naturwissenschaften eingesetzt (vgl. Kopenhagen et al. 2012, S. 2). Die DSR-Methodologie wird als Problemlösungsparadigma beschrieben und ist iterativ. Die Suche nach einer optimalen Lösung bzw. einem optimalen Design ist nicht statisch, denn die entwickelten Artefakte müssen kontinuierlich gegenüber neuen Anforderungen aus der relevanten Umgebung, bspw. gegenüber dem Managementsystem in dem die Artefakte eingesetzt werden, geprüft werden (vgl. Hevner et al. 2004, S. 89–90). Die Anwendungen dieser Methodologie im Bereich der Produktionsdigitalisierung sind zahlreich. Als Beispiel sei hier der Artikel von Lu et al. genannt, der die DSR-Methodologie verwendet, um Artefakte für die Integration von Wertstromanalyse und digitalem Zwilling in der Produktion zu designen (vgl. Lu et al. 2021, S. 767).

In wissenschaftlichen Veröffentlichungen zur Design Science Research Methodologie werden vier Phasen genannt, die im Rahmen der Methodik durchgeführt werden. Abbildung 13 zeigt den Ablauf des Design Science Research Forschungsansatzes sowie der gängigen Forschungsmethoden, die in den jeweiligen Phasen angewendet werden. In der ersten Phase der Design Science Research Methodologie wird eine Problemstellung definiert, die durch eine Analyse der bisherigen Forschung identifiziert werden kann. Die Grundlage für den DSR-Ansatz bildet oftmals eine Problemstellung, die aus der Unternehmenspraxis stammt oder durch einen Optimierungsbedarf eines bereits entwickelten Systems initiiert wird (vgl. Kopenhagen et al. 2012, S. 4).

Die zweite Phase der Methodologie, wird als deduktive bzw. induktive Phase bezeichnet. Sie widmet sich der Analyse der bisherigen Forschung sowie der Analyse des relevanten Umfeldes zur definierten Problemstellung. Dabei steht die Identifikation von Ausgangspunkten für das Design der Artefakte im Vordergrund (vgl. Kopenhagen et al. 2012, S. 4). Das relevante Umfeld kann das organisatorische Umfeld (Strategien, Systeme und Prozesse) oder das technologische Umfeld (Infrastruktur und Anwendungsfelder) sein (vgl. Abbildung 13).

Die dritte Phase des DSR-Ansatzes wird genutzt, um Artefakte zu entwerfen, die für die Lösung der Problemstellung gebraucht werden (vgl. Seyfried et al. 2023, S. 52). Die Erstellung von sogenannten Artefakten kann zu verschiedenen Ergebnissen führen, da der Begriff des Artefakts in der DSR-Methodologie nicht

---

eindeutig definiert ist. Die Forschung nennt verschiedene Arten von Artefakten, die mit der Methodologie entwickelt und evaluiert werden können. Genannt werden beispielsweise eine System Beschreibung, die Definition von Anforderungen an ein System sowie Guidelines und Metriken (vgl. Offermann et al. 2010). Diese Arbeit fokussiert sich auf die Konzeptionierung der Nutzung von digitalen Technologien. Daher sind die Inhalte dieser Arbeit stärker auf die ersten drei Phasen des DSR-Ansatzes ausgerichtet, da diese sich auf die Erstellung des Konzepts konzentrieren. Im Rahmen der Analyse des Lösungsraumes, werden zur Lösung der Problemstellung die wissenschaftlichen Grundlagen untersucht. Die Analyse der wissenschaftlichen Grundlagen und Identifikation von Lösungen für die Problemstellung, kann durch verschiedene Methoden wie bspw. Durch Messungen, Daten Analysen von bestehenden Datensätzen oder Literaturrecherchen erfolgen. Die Methode der Literaturrecherche wird angewendet um Theorien, Modelle oder Rahmenwerke zu untersuchen und als Grundlage für die Erstellung der Artefakte zu verwenden (vgl. Abbildung 13).

In der letzten Phase der DSR-Methodologie, der Evaluation, wird überprüft ob die erstellten Artefakte das Problem lösen. Für die Überprüfung der Problemlösung durch die Artefakte können verschiedene Mittel genutzt werden. Je nach entworfenem Artefakt eignen sich unterschiedliche Vorgehensweisen wie Experimente, Feldstudien, Umfragen oder Experten/Expertinnen-Interviews. Durch die Evaluation werden die entworfenen Artefakte, falls notwendig, angepasst und verbessert. Die entworfene Lösung für die anfangs definierte Problemstellung, das Artefakt bzw. die Artefakte, werden dann in der relevanten Umgebung, bspw. Industrieunternehmen, angewendet. Die Anwendung schafft neue Erkenntnisse und erweitert somit die Wissensbasis (vgl. Abbildung 13).

### **3.2 Vorgehensweise**

Dieses Kapitel beschreibt die Umsetzung der DSR-Methodologie in dieser Arbeit. Die erste Phase der DSR-Methodologie (Initiierungssphase) wurde im Rahmen der Definition der Problemstellung, die von dieser Arbeit bearbeitet wird, durchgeführt. Auf Basis einer Literaturrecherche wurde eine Forschungslücke identifiziert und die sich daraus ergebene Forschungsfrage, die sich auf Implikationen der relevanten Forschung stützt, in Kapitel 1 vorgestellt. Die erste Phase des DSR-Ansatzes wird ebenfalls genutzt, um die Relevanz des Themas zu untersuchen. Dies wird im Rahmen dieser Arbeit im Kapitel 2.1 durchgeführt, in dem der entscheidende Beitrag der Industrie für das Aufhalten des Klimawandels, sowie die zunehmende staatliche Regulierung von Nachhaltigkeit in Unternehmen, erklärt werden.

Die zweite Phase der DSR-Methodologie, die Entwicklungsphase, beschäftigt sich mit der Analyse des Lösungsraumes für die Forschungsfrage. Die umfangreiche Literaturrecherche des Kapitels 2 untersucht die wissenschaftlichen Grundlagen zum Thema Nachhaltigkeit und Digitalisierung in der Industrie und stellt wichtige Publikationen aus dem relevanten Umfeld des Nachhaltigkeits- und Umweltmanagements vor. Die Wissenschaftsdatenbank Web of Science wird in vielen wissenschaftlichen Artikeln aus der Nachhaltigkeitsforschung als geeignete wissenschaftliche Datenbank angegeben (vgl. Ruggerio. 2021, S. 1). Web of Science zeichnet sich insbesondere durch genaue Such-, Sortier- und bibliographische Analysemöglichkeiten aus. Auch in dieser Arbeit wird Web of Science zur Suche von relevanten Artikeln genutzt. Des Weiteren wird Standardliteratur verwendet, insbesondere an Stellen an denen bereits existierende und wohlbekannte Systeme oder Prozesse beschrieben werden. Hier seien insbesondere die europäische



---

Normen (EN) des Deutschen Instituts für Normung (DIN) und der Internationalen Organisation für Standardisierung (englisch: International Standardization Organization, ISO) zu Managementsystemen genannt, welche zuvor eingeführt wurden. Darüber hinaus werden in Kapitel 2 Informationen aus Fachgremien, Initiativen, Berichten sowie Webinhalten und neuen Konzepten ausgewertet. Die wichtigsten Standards und Regularien für Unternehmen im Nachhaltigkeitsmanagement werden vorgestellt und es wird untersucht, wie in Industrieunternehmen Nachhaltigkeit systematisiert wird. Außerdem werden Nachhaltigkeitsziele vorgestellt und Methoden beschrieben, mit denen Nachhaltigkeitsziele quantifiziert werden. Auch die Stellhebel für Nachhaltigkeit werden untersucht. Dabei wird insbesondere auf die Rolle der digitalen Technologien eingegangen. Aktuelle Anwendungsfälle werden vorgestellt und Digitalisierungskonzepte beschrieben.

Im Rahmen der Design Phase, der dritten Phase des DSR-Ansatzes, wird der SIA-DT Managementprozess entworfen, der gängige Vorgehensmodelle wie den CRISP-DM und den DMME Prozess erweitert. Die Erweiterung des DMME Prozesses baut auf den aus der Literaturrecherche abgeleiteten Design-Empfehlungen auf. Diese werden in Tabelle 10 übersichtlich zusammengestellt. Der SIA-DT Prozess erweitert den DMME um Phasen, die Nachhaltigkeitsziele bei der Auswahl und Implementierung von digitalen Technologien in den Vordergrund stellen und es wird eine Verknüpfung mit strategischen Nachhaltigkeitszielen erreicht. Auf Basis der vorangegangenen Literaturrecherche in Kapitel 2 wird begründet, in welchen Managementsystemen der Prozess integriert werden muss, und welche Phasen bei der nachhaltigkeitsintegrierten Implementierung von digitalen Technologien zusätzlich berücksichtigt werden müssen.

In der vierten Phase, der Evaluation, wird überprüft, ob der SIA-DT Prozess von Experten/Expertinnen als sinnvoll eingestuft wird und welches Potential die Anwendung eines solchen Prozesses in der produzierenden Industrie hat. Die Experten/Expertinnen werden darum gebeten offene Kritik am Prozessmodell zu üben, um Verbesserungsmöglichkeiten aufzudecken. Den vier befragten Interview-Teilnehmenden wird der Fragebogen vorab zur Verfügung gestellt. Die Interviews werden aufgezeichnet und im Nachhinein transkribiert. Das Transkript wird zusammengefasst und die wichtigsten Antworten der Experten den Fragen der Interviewleitfäden zugeordnet. Diese sind im Anhang zu finden. Die Ergebnisse der Interviews werden auch an Stellen in der Arbeit verwendet, an denen die Antworten der Experten/Expertinnen, die Argumentation und die Ergebnisse der Entwicklungsphase und der Designphase unterstützen. So wird dargelegt, dass wichtige Designaspekte aus den vom Prozess betroffenen Bereichen, richtig identifiziert und in der Entwicklungsphase berücksichtigt sind. Abschließend wird eine Diskussion der Ergebnisse durchgeführt. Potenziale und Limitierungen des Prozesses werden aufgezeigt und Anregungen für zukünftige Forschungsarbeiten gegeben. Es wird diskutiert, für welche Unternehmen und Anwendungsfälle sich der Prozess besonders gut eignet.

---

## 4 Design eines nachhaltigkeitsgetriebenen Digitalisierungsprozesses

---

Das Kapitel Design eines nachhaltigkeitsgetriebenen Digitalisierungsprozesses bildet die dritte Phase des DSR-Forschungsansatzes ab. Die Erkenntnisse der zweiten Phase des DSR-Ansatzes, der Analyse des Lösungsraumes, welche in dieser Arbeit mittels der Methode der Literaturrecherche, durchgeführt ist, werden in diesem Kapitel für das Design eines Managementprozesses für Digitalisierungsprojekte genutzt. Das entwickelte Artefakt ist der nachfolgend vorgestellte SIA-DT Managementprozess. In welches System das Artefakt eingebettet werden soll, wird erklärt und die für die Entwicklung des Managementprozesses betrachteten Empfehlungen, die sich aus der Literaturrecherche ergeben (s. Kapitel 2), vorgestellt. Die Grundlagen, Standards und die Modellierungselemente, die für das Design des Prozesses genutzt werden, sind nachfolgend beschrieben. Die Designempfehlungen der Literatur werden mit dem vorgeschlagenen Entwurf des SIA-DT Prozessmodells verknüpft. Das Kapitel erklärt die Designelemente sowie Phasen und Schritte des Prozessmodells.

### 4.1 Prozessmodellierung

Für die Modellierung von Managementprozessen und technischen Prozessen gibt es verschiedene Modelle. Nicht jedes Modell ist für jeden Einsatzzweck gleich gut geeignet. Ein Hauptaugenmerk der industriellen Prozessmodelle liegt auf der Strukturierung und Verbesserung von Entscheidungsprozessen und der Erhöhung der Prozessleistung von Industrieprozessen (vgl. Dorador und Young, 2000, S. 431). Im Folgenden werden drei Modellierungskonventionen vorgestellt. Wesentliche Unterschiede werden hervorgehoben und eine für die Modellierung des SIA-DT Prozesses geeignete Modellierungskonvention wird ausgewählt. Neben der BPMN-Konvention werden weitere Konventionen zur Prozessmodellierung beschrieben, die in der Industrie genutzt werden. Wichtige Modelle sind das Wertstromdesign oder das Integrated Definition Model ( IDEF) (vgl. García-Domínguez et al., S. 593). Nachfolgend werden diese drei Modellierungskonventionen untersucht, da sie in der Industrie häufig zum Einsatz kommen (vgl. García-Domínguez et al., S. 593).

#### 4.1.1 IDEF3

Wie bei allen Prozessmodellen ist die Entwicklung der ersten Stufe der Integrated Definition for Process Description Method (IDEF0) hauptsächlich durch die Notwendigkeit getrieben, dass Prozesse analysiert und optimiert werden sollen. Die Kommunikation eines Prozessmodells sollte mit IDEF0 verbessert werden. IDEF0 wurde hauptsächlich genutzt, um Prozesse darzustellen, die eine enge Verknüpfung von Aufgabe und Technik betrachten. Anders als bei anderen Modellen steht die Objekt-Funktionsbeziehung im Zentrum der Modellierung (vgl. Kusiak et al. 1994, S. 521).

Die erste Entwicklungsstufe des IDEF-Modells wurde genutzt, um zu einem Prozess zugehörige Hardware und Aufgaben zu modellieren. Dabei besteht das IDEF0 Model aus drei Komponenten. Diese sind Diagramme, Texte und ein Glossar. Diese Kernelemente der Modellierungskonvention IDEF0 stehen miteinander in definierten Wechselwirkungen (vgl. Kusiak et al. 1994, S. 522). IDEF0 wird hauptsächlich zur Darstellung von Informationsflüssen zwischen Objekten und deren Bezug zu Funktionen genutzt. Der

---

große Vorteil von IDEF0 ist die Einfachheit des Modells. Gerade bei wenig komplexen Prozessen, kann mit IDEF0 ein sehr strukturiertes und einfach verständliches Bild des Prozesses und insbesondere der Informationsflüsse gezeichnet werden (vgl. Dorador und Young. 2000, S. 432). Für komplexe Prozesse die sowohl technische als auch nicht-technische Funktionen vereinen, ist das IDEF0 sowie das später entwickelte IDEF3 Modell weniger geeignet. Wenn ein Prozess mit anderen Unterprozessen wechselwirkt, ist das IDEF3 Modell dahingehend beschränkt, dass es diese Wechselwirkungen nicht darstellen kann (vgl. Dorador und Young. 2000, S. 432).

Das IDEF3 Modell erweitert das IDEF0 Modell um eine Prozessflussbeschreibung, sowie eine Statusbeschreibung für die referenzierten Objekte. Ähnlich wie andere Prozessmodelle arbeitet auch das IDEF3 Modell mit Gateways. IDEF3 bietet hierzu Verknüpfungen und Gabelungen an. In der IDEF3 Notation werden diese als AND-Verknüpfung sowie OR-Gabelungen angegeben. Zusätzlich gibt es EXCLUSIVE OR Gabelungen. Die Gabelungen und Verknüpfungen wirken auf dieselbe Weise wie die gleichnamigen Booleschen Operatoren (AND, OR und XOR). Sie werden dann genutzt, wenn Entscheidungen modelliert werden.

Im Gegensatz zu anderen Modellen, werden Datenobjekte bei IDEF3 nicht weiter spezifiziert (vgl. Kusiak et al. 1994, S. 523). Auch wenn IDEF3 nicht sonderlich geeignet ist, für die integrierte Darstellung mehrerer wechselwirkender komplexer Prozesse, so lässt das IDEF3 Modell doch eine komplexe Analyse zu. Insbesondere die Analyse von Inputs, Outputs und Beschränkungen sowie Interaktionen zwischen einzelnen Funktionen können gut abgebildet werden. Genau wie BPMN 2.0 wird auch IDEF0 und IDEF3 für die Modellierung von Geschäftsprozessen genutzt. Durch den stärkeren Fokus auf die Interaktion von Funktionen und Objekten, wird das IDEF3 Modell häufiger für technische Prozesse verwendet, welche Interaktionen mit Objekten benötigen. Als Beispiel sei hier der Wartungsprozess genannt (vgl. Ferreira und Oliveira. 2019, S. 1168).

Auch wenn das IDEF3 Modell eine deutliche Verbesserung und Steigerung der Flexibilität des IDEF0 Modells bringt, ist es für die Modellierung des SIA-DT Prozessmodells weniger gut geeignet als andere Modellierungskonventionen, da der SIA-DT Prozess ein, mit anderen Unterprozessen, vernetzter Prozess ist. Bspw. der DMME und PDCA-Prozess. Die Verknüpfung mit anderen Prozessen und die Einbettung in ein Managementsystem, können im IDEF-Modell nur schwer dargestellt werden. Neben dem IDEF-Modell gibt es weitere Modelle, die in der Industrie Anwendung finden. Ein weiteres wichtiges, insbesondere im Produktionsmanagement häufig verwendetes Model, ist das Wertstrom Design.

#### **4.1.2 Wertstromanalyse**

Die Wertstrom Methode, Wertstrom Design oder auch Wertstromanalyse, die ursprünglich zur Darstellung von Materialflüssen für die Produktionsflussoptimierung genutzt wurde, wird heute immer häufiger im Kontext der Industrie 4.0 eingesetzt. Die Methode wird u. a. dazu verwendet, besondere Ineffizienzen und Stellhebel in der Produktion aufzudecken, an denen eine Prozess-Digitalisierung das Potenzial zu einer erheblichen Steigerung der Effizienz oder Effektivität des Produktionsprozesses besitzt. Die Ergebnisse einer Wertstromanalyse können als Ausgangspunkt für Industrie 4.0 Projekte verwendet werden (vgl. Arey et al. 2021, S. 19).

Die Wertstromanalyse (englisch: Value Stream Mapping, VSM) wird traditionell für die Messung nicht wertschöpfender, verschwenderischer oder ineffizienter Prozesse und Abläufe in der Produktion genutzt und ist eine weit verbreitete und akzeptierte Methode zur Verbesserung von Produktionsprozessen (vgl. Edtmayr et al. 2016, S. 289; Lu et al. 2021, S. 764). Die Wertstromanalyse wird oftmals angepasst und erweitert, um neben den Informationsflüssen und Materialflüssen auch Informationsverschwendung und digitale Informationswege zu betrachten. Diese Form der Wertstromanalyse wurde insbesondere von Hartmann et al. untersucht. Es wurde die Methode der VSM 4.0 entwickelt (vgl. Hartmann et al. 2018, S. 249).

Die Analyseschwerpunkte von VSM 4.0 und ähnlichen Modellen (bspw. DVSM), liegen auf den digitalen Daten. Drei wichtige Elemente, die bei der VSM 4.0 untersucht werden, sind: Die Digitalisierungsrate (englisch: Digitization Rate, DR), die Daten-Verfügbarkeit (englisch: Data Availability, DA) und die Daten-Nutzung (englisch: Data Usage, DU). Die Digitalisierungsrate beschreibt, wie viele Informationen aus dem Produktionsprozess digital erfasst und gespeichert werden. Die Daten werden normalisiert, indem die Anzahl an digital erfassten und gespeicherten Daten durch alle Daten des Wertstroms, einschließlich der analog erfassten Daten, dividiert wird. Mit der Kennzahl Datenverfügbarkeit wird gemessen, wie groß der Anteil an gespeicherter Information ist und dieser Anteil in Bezug zur erwünschten Datenmenge bewertet. Die Kennzahl der Datennutzung beschreibt, welcher Teil der Daten tatsächlich für Aufgaben wie beispielsweise der Entscheidungsunterstützung genutzt wird (vgl. Hartmann et al. 2018, S. 252). Zur Veranschaulichung werden diese Kennzahlen nun mit der Berechnungsgleichung dargestellt. Ein ausführliches Beispiel für die Prozessanalyse mittels VSM ist in der Studie von Hartmann et al. zu finden (vgl. Hartmann et al. 2018, S. 253).

$$DR = \frac{\sum \text{automatically aquired and digitally captured data}}{\sum \text{total captured data}} \quad \text{Gl. 4-1}$$

$$DA = \frac{\sum \text{captured information}}{\sum \text{desired information}} \quad \text{Gl. 4-2}$$

$$DU = \frac{\sum \text{used information}}{\sum \text{captured information}} \quad \text{Gl. 4-3}$$

Quelle: Hartmann et al. 2018, S. 252

Für die Implementierung des Industrie 4.0 Konzeptes wird oftmals die Chance, vernetzte Produktionsprozesse in Echtzeit nachzuverfolgen und bei Abweichungen schnell reagieren zu können, als Begründung des großen Mehrwerts der Industrie 4.0 genannt. Hierbei kann eine DVSM-Methode eingesetzt werden (Digital Value Stream Mapping) um Abhängigkeiten zwischen Produktionsprozessen logisch zu verifizieren und Shop Floor Abhängigkeiten aufzudecken, die andernfalls unbeobachtet bleiben (vgl. Arey et al. 2021, S. 21). Das Potenzial der DVSM liegt bei der Betrachtung des Industrie 4.0 Anwendungsfalles deutlich auf der Analyse von Prozessen und deren Datenverwertung (vgl. Trebuna et al. 2019, S. 30). Die DSVM-Methode ähnelt stark der VSM 4.0 Methodik, setzt jedoch den Fokus auf die Messung der Leistungssteigerung des Wertstroms durch Industrie 4.0 Technologien. Hierzu werden mehr Kennzahlen für die Bewertung der digitalen Leistung eingeführt (vgl. Arey et al. 2021, S. 22; Hartmann et al. 2018, S. 254).

---

Die DVSM, die einen stärkeren Fokus auf die Analyse von digitalen Informationsflüssen setzt, wird genutzt um die Verknüpfung von digitalen und nicht digitalen Informationsflüssen in der Produktion zu verstehen und ggf. zu optimieren (vgl. Arey et al. 2021, S. 21). Obwohl die VSM-Methode, zur Darstellung von Entscheidungen genutzt werden kann, ist sie in erster Linie ein Modell das Ineffizienzen im Produktionsfluss analysiert. Die VSM Methodik ist ein Werkzeug zur datengetriebenen Planung von Produktionsprozessen (vgl. Lu et al. 2021, S. 764). In Bezug auf den Einsatz bei Industrie- und Produktionsdigitalisierung zeigt die Forschung, dass die Wertstromanalyse überwiegend bei der Optimierung und der Planung der Nutzung von Technologien eingesetzt wird.

Für die Nachhaltigkeitsverbesserung erfüllt die Wertstromanalyse einen ähnlichen Zweck, wie diese bei der Digitalisierung von Produktionsprozessen besitzt. Lean Production (deutsch: Schlanke Produktion) ist ein Managementkonzept das in der Literatur als wichtiger Werkzeugkasten zur Verbesserung der Nachhaltigkeit in der Produktion beschrieben wird, da Verschwendung reduziert und der Einfluss von Produktionsprozessen auf die Umwelt bewertet werden kann. Eine Wertstromanalyse, die im Rahmen der Lean Production angewendet wird, kann dazu genutzt werden, Nachhaltigkeitspotenziale zu identifizieren und Verschwendung zu vermeiden (vgl. Faulkner und Badurdeen. 2014, S. 8). Im Nachhaltigkeitsmanagement kann durch die VSM die Ressourceneffizienz für Produktionsprozesse stark verbessert werden. Die Ergebnisse einer VSM bilden eine Datengrundlage für die Berechnung von Nachhaltigkeitskennzahlen (vgl. Edtmayr et al. 2016, S. 293). Die Anwendung der VSM zur Identifikation von Nachhaltigkeitspotenzialen wird in der Literatur auch als E-VSM (Environmental Value Stream Mapping) bezeichnet (vgl. Garza-Reyes et al. 2018, S. 355; Muñoz-Villamizar et al. 2019, S. 608). Die Wertstromanalyse kann ebenfalls dazu genutzt werden, den Einfluss von nachhaltigen Praktiken und der Implementierung dieser Praktiken in Produktionsprozessen, auf die Produktivität der Prozesse zu bewerten. Unternehmen können dadurch eine optimale Verknüpfung zwischen der Implementierung effizienter und schlanker Prozesse und der Erreichung einer nachhaltigen Produktion erzielen (vgl. Muñoz-Villamizar et al. 2019, S. 608).

#### **4.1.3 BPMN 2.0**

Zur Modellierung des SIA-DT Prozesses wird die Modellierungskonvention BPMN 2.0 genutzt. Nachfolgend werden die Gründe für die Verwendung von BPMN 2.0 vorgestellt. Die Abkürzung BPMN 2.0 steht für Business Process Model and Notation. BPMN 2.0 ist aktuell der am häufigsten genutzte Standard in der Geschäftsprozessmodellierung, wird aber auch zur Modellierung von technischen Prozessen genutzt. Die Struktur von BPMN 2.0 ermöglicht es ganze Organisationen abzubilden (vgl. García-Domínguez et al., S. 593; SAP Signavio 2023). BPMN 2.0 wird in der Literatur als hocheffiziente Modellierungskonvention beschrieben, mit der Prozesse, die über mehrere Domänen verlaufen, modelliert werden können. BPMN 2.0 ist anders als andere Modelle, durch eine Vielzahl an modellierbaren Elementen, flexibler. Um Standardabläufe und -protokolle abzubilden, ist BPMN 2.0 genauso gut geeignet (vgl. Ferreira und Oliveira. 2019, S. 1162). García-Domínguez et al. haben einen tabellarischen Vergleich der in dieser Arbeit beschriebenen Modellierungskonventionen durchgeführt. Dieser Vergleich ist in Tabelle 7 zu sehen. Für einen graphischen Vergleich der Modelle können die im Anhang abgebildeten Darstellungen eines Beispielprozesses in der Fertigung betrachtet werden. In Anhang 1 wird die Wertstromanalyse genutzt. Anhang 2 zeigt denselben Prozess im IDEF3 Modell. Anhang 3 nutzt BPMN 2.0.

**Tabelle 7:** Vergleich der drei Modellierungskonventionen

	IDEF3	Value Stream Mapping	BPMN 2.0
<b>Activity Sequence</b>	Fine-grained (control flows)	Coarse (material flows)	Fine-grained (control flows, events)
<b>Timing Constraints</b>	Implicit (text)	Implicit (text)	Explicit (alarms)
<b>Machine / Operator Assignments</b>	Implicit (objects)	Implicit (data boxes)	Implicit (lanes)
<b>Material Flows</b>	Implicit (object transitions)	Explicit	Implicit (messages)
<b>Information Flows</b>	Needs IDEF0 / IDEFIX	Explicit, no internal structure	Explicit, relies on extensions for internal structure

Quelle: Eigenerstellung in Anlehnung an García-Domínguez et al., S. 599

Bei BPMN 2.0 wird die Sequenz der Aktivitäten durch Events (bspw. Gateways) und Kontrollflüsse gesteuert (Sequenzflüsse, Nachrichtenflüsse und Assoziationen). Diese Eigenschaft ist besonders nützlich für die Modellierung von Entscheidungs- und Auswahlprozessen. Auch Zeitbedingungen, wie das Warten auf eine Nachricht, ein Signal oder die Erfüllung von Bedingungen, können anders als bei IDEF und der Wertstromanalyse explizit, d.h. in Form von Symbolen und Grafiken, dargestellt werden. Auch diese Eigenschaft, macht das BPMN 2.0 Modell für das SIA-DT Prozessmodell zum bevorzugten Standard. Die Zuweisung von Verantwortlichen für die einzelnen Aufgaben erfolgt implizit. Die Aufgaben werden hierzu in die Swimlane des jeweiligen Funktionsbereichs oder der ausführenden Person gelegt. Auch das IDEF-Modell und die Wertstromanalyse greifen auf eine implizite Darstellung der Aufgabenzuweisung zurück. Bei Materialflüssen werden im IDEF-Modell und im BPMN 2.0 Modell implizite Darstellungen gewählt. Da BPMN 2.0 und IDEF-Modelle hauptsächlich für die Darstellung von Informationsflüssen zwischen technischen Objekten und Aufgaben genutzt werden, sind Materialflüsse hier in Form von Nachrichten dargestellt. Das Wertstrommodell hingegen erlaubt eine explizite Darstellung von Materialflüssen, da hier zumeist tatsächlich materielle Ressourcenflüsse modelliert werden (vgl. Tabelle 7).

BPMN 2.0 wird immer häufiger im Rahmen der Digitalisierung und Softwareentwicklung genutzt. Denn anders als bei anderen Modellen, werden hier keine Abläufe auf der kleinsten Betrachtungsebene wie einer einzelnen Maschine oder gar einem einzelnen Sensor dargestellt, sondern Entscheidungsabläufe für Ingenieure/Ingenieurinnen, Analysten/Analystinnen und Management-Rollen. Oftmals wird das BPMN-Modell genutzt um Prozesse darzustellen, die anschließend für Entwicklungsprozesse oder das Business Process Reengineering (BPR) genutzt werden (vgl. Corradini et al. 2018, S. 129; García-Domínguez et al., S. 595). BPR wird angewendet, um Potenziale und mögliche Effizienzsteigerungen zu erreichen und Ansatzpunkte und Schnittstellen für die Softwareimplementierung zu identifizieren. Häufig werden auch mögliche Funktionen und Schritte oder Aufgaben für den Einsatz von Automatisierungslösungen betrachtet. BPMN 2.0 kann beispielsweise genutzt werden, um einen Geschäftsprozess in einer Weise umzugestalten, dass eine optimale Anbindung an eine Software Lösung möglich ist (vgl. Gonzalez-Huerta et al. 2017, S. 171).

BPMN 2.0 bietet nicht nur viele Vorteile, sondern wurde ebenfalls als ISO Standard aufgenommen (vgl. Geiger et al. 2018, S. 250). Eine transparente Kommunikation von Geschäftsprozessen wird immer wichtiger. Mit zunehmender Nachfrage und Anforderungen an Prozesstransparenz und transparenten Systemen in Unternehmen, wird das Bewusstsein der Anteilseigner und Stakeholder für transparente Geschäftsprozesse zu einem bedeutenden Erfolgsfaktor (vgl. Corradini et al. 2018, S. 129). Im Zuge der immer strenger werdenden Nachhaltigkeitsregulierungen wird eine transparente Kommunikation der Prozesse zur Nachhaltigkeitserreichung vorausgesetzt. Das entwickelte SIA-DT Prozessmodell soll in einer Art und Weise modelliert werden, dass es für die Kommunikation des Vorgehens zur Nutzung digitaler Technologien für die Nachhaltigkeitserreichung und -verbesserung verwendet werden kann.

Eine kritische Analyse des BPMN-Modells zeigt, dass vorrangig drei Faktoren wichtig für ein gutes BPMN-Modell sind. Zunächst benötigt das Modell eine Verbindung zu den vorhandenen Technologien, Datenbanken, sowie Dokumenten und Methoden. Das Modell ermöglicht eine Kommunikationsbasis zwischen den in Tabelle 8 gezeigten Stakeholdern.

**Tabelle 8:** Stakeholder und Ansprüche an ein BPMN 2.0 Modell

<b>Top Management</b>	Modelling the process in a way, such that it can be communicated to relevant stakeholders, is supported by top management with necessary resources and easy to understand for both technical and business experts.
<b>Process Owner</b>	Enable process steering and include functions to steer performance and quality evaluations for process management and improvement.
<b>Technology Experts</b>	Enable a clear understanding of technology interfaces, the role of technical systems and their contribution throughout the process.
<b>Business Users</b>	Develop an easy-to-understand structure that can be assessed by business users for application.

Quelle: Eigenerstellung in Anlehnung an Börger. 2012, S. 315

Der zweite wichtige Erfolgsfaktor für ein gutes BPMN-Modell liegt in der Evaluation. Das BPMN-Modell sollte auf seine Verständlichkeit und Umsetzbarkeit von Prozessverantwortlichen, technischen Experten/Expertinnen und Anwendern (vgl. Tabelle 8) geprüft werden. Dies kann mathematisch, experimentell oder qualitativ durchgeführt werden, sollte jedoch fundiert sein. Der dritte wichtige Erfolgsfaktor ist die Unterstützung des Prozesses durch das Top Management. Nur wenn der Prozess im Unternehmen verankert ist und an Stakeholder kommuniziert wird, ist die aktive Nutzung des Prozesses wahrscheinlich (vgl. Börger. 2012, S. 315).

Zur Modellierung des SIA-DT Prozessmodells in BPMN 2.0 wird SAP Signavio verwendet. SAP Signavio ist eine Softwarelösung für die Modellierung in BPMN 2.0 und bietet die Möglichkeit, den modellierten Prozess zu simulieren und auf Geschlossenheit, Simulationsfähigkeit und Fehler zu überprüfen. Der Prozess kann zudem auf Ineffizienzen, wiederholende Schleifen und Sackgassen (englisch: Deadlocks) überprüft werden (vgl. TU Darmstadt. 2022, S. 1).

---

Der SIA-DT Prozess beschreibt ein definiertes Vorgehen, bei denen eine Reihe von Arbeitsschritten in Phasen gegliedert sind, die durch sogenannte Gates (auch: Quality-Gates) abgeschlossen werden. Die BPMN 2.0 Konvention ist für die Modellierung dieses Prozesses gut geeignet. BPMN 2.0 setzt den Fokus auf die Schnittstelle zwischen Technologie und Mensch. Vergleicht man Wertstrom Modell, das IDEF-Modell und das BPMN 2.0 Modell um einen Prozess zu modellieren, zeigt sich das BPMN 2.0 eine besonders gute Eignung zur Prozessmodellierung besitzt, wenn der Prozess informationsintensiv ist (vgl. García-Domínguez et al., S. 600). Das SIA-DT Prozessmodell besitzt diese Eigenschaften, sodass die Anwendung von BPMN 2.0 am sinnvollsten ist. Ein BPMN-Diagramm besteht aus verschiedenen graphischen Elementen. Hierzu gehören die Aufgaben, die Ereignisse, die Zwischenereignisse, die Gateways, Datenobjekte und weitere Elemente. Die Elemente, die für die Modellierung des SIA-DT Prozessmodells verwendet werden, sind in Kapitel 4.4 beschrieben.

## 4.2 Vorgehensmodelle für die Technologieimplementierung

Für die Entwicklung des SIA-DT Prozesses wird auf Prozess- und Vorgehensmodelle zurückgegriffen, die im Technologie- und Digitalisierungsmanagement eingesetzt werden. Die Referenzmodelle für die Implementierung digitaler Technologien werden auf ihre Eignung als Grundlage für den SIA-DT Prozess geprüft. Im Folgenden sollen das Stage-Gate-Modell und die Vorgehensmodelle CRISP-DM und DMME vorgestellt werden. Sowohl das Stage-Gate Prozessmodell als auch die Vorgehensmodelle CRISP-DM und DMME werden in der Literatur immer wieder als geeignete Modelle der Technologieimplementierung vorgestellt. Wie diese Modelle aufgebaut sind, wird in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

### 4.2.1 Stage Gate

Der Stage-Gate Prozess wurde erstmals 1990 eingeführt und besitzt grundlegende Vorteile gegenüber anderen Prozessmodellen. Der Stage Gate-Prozess bietet einen Überblick über die gesamten Projektphasen und besitzt Entscheidungspunkte (Gates), an denen Entscheidungen über die Projektfortführung nach vorher festgelegten Kriterien durchgeführt werden (vgl. Cooper. 1990, S. 53–54). Der Stage-Gate Prozess wird in Unternehmen eingesetzt, um die Entwicklung sowie den Einsatz neuer Technologien zu organisieren. Für die Gestaltung eines Technologiemanagementprozesses wie dem Stage-Gate Prozess sind die Strukturierung des Prozesses, die Synchronisierung von Teilschritten und die Zusammensetzung des Projektteams entscheidende Erfolgsfaktoren (vgl. Wördenweber. 2020, S. 157).

Der Stage-Gate Prozess wird nicht nur für das Technologiemanagement verwendet, sondern kommt auch bei der Einführung neuer Technologien und Geschäftsmodelle im Rahmen der digitalen Transformation in industriellen Unternehmen zum Einsatz. Der Einsatz eines Stage-Gate Modells bietet auch im Innovationsmanagement Vorteile, wie die Erhöhung der Agilität des Managements, da kontinuierliche Reviews das rechtzeitige Eingreifen und die Planung von Nacharbeit erleichtern (vgl. Rummel et al. 2022, S. 685). Neben dem Einsatz des Stage-Gate Modells im Rahmen des Technologiemanagements und dem Management von Geschäftsmodellinnovationen, wird der Prozess auch in anderen Bereichen in produzierenden Unternehmen, wie dem Qualitätsmanagement, angewendet. Die Produkt- und Prozessqualität sind für industrielle Unternehmen ein wichtiger Erfolgsfaktor. Der Stage-Gate Prozess wird ebenfalls eingesetzt



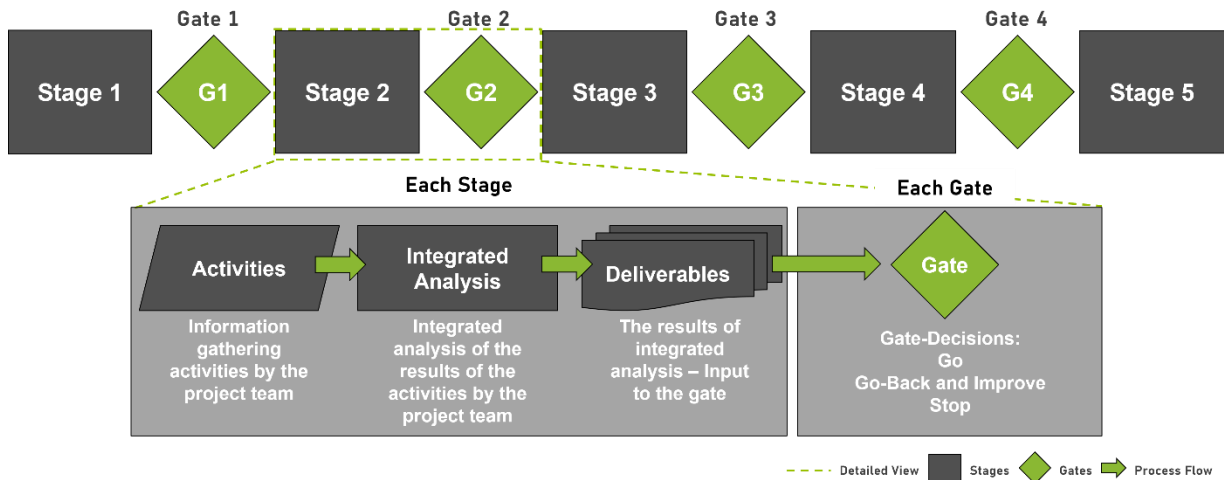
---

um systematisch die Prozessqualität und die Produktqualität entlang des Produktentstehungsprozesses zu verbessern (vgl. Wuest et al. 2014, S. 32).

Der Einsatz des Stage-Gate Modells zur Verbesserung der Prozessqualität erfolgt durch die Einrichtung von Qualitätsgates zwischen den einzelnen Bearbeitungsprozessen im Produktentstehungsprozess. Dies können Fertigungs- oder Montageprozesse sein. Durch die Überprüfung der Produkte mittels Qualitätschecklisten nach jedem Wertschöpfungsschritt wird vermieden, dass fehlerhafte Produkte in den nächsten Bearbeitungsschritt gelangen. Unnötige Wertschöpfung wird so unterbunden und Fehler in den nachgelagerten Prozessen, die durch fehlerhafte Teile ausgelöst werden, vermieden. Die empirische Zehnerregel der Qualität, die hier zum Tragen kommt, besagt dass in jedem weiteren Wertschöpfungsschritt der Produktentstehung die Kosten für die Nacharbeit von Fehlern um das Zehnfache erhöht werden. Durch die Verhinderung der Weiterverarbeitung fehlerhafter Produkte werden Ausfallzeiten von Anlagen und Beständen reduziert (vgl. Wuest et al. 2014, S. 36).

Abbildung 14 zeigt in übersichtlicher Form die Grundbestandteile und -struktur eines Projektmanagementprozesses nach dem Stage-Gate Ansatz. Während der ursprüngliche Stage-Gate Prozess auf die Produktentwicklung ausgerichtet war, nutzen moderne Forschungen den Prozess auch in anderen Bereichen wie dem Qualitätsmanagement. Die grundlegende Gestaltung des Stage-Gate Prozesses und dessen Struktur bleibt jedoch gleich. Der Stage-Gate Prozess gliedert die Aufgaben in Phasen bzw. Stages und die Entscheidungspunkte in Gates. In jeder Phase werden dabei Aktivitäten durchgeführt, in denen das Projektteam Informationen erhebt. Diese Informationen dienen dazu, den Zweck der Phase zu erreichen. Innerhalb jeder Phase werden die erhobenen Informationen verwendet, um eine integrierte Analyse durchzuführen. Die integrierte Analyse beschreibt die Verknüpfung der Informationen. Im letzten Schritt jeder Phase werden die Ergebnisse der Phase erarbeitet. Diese Ergebnisse können bspw. Berechnungen oder technische Konzepte sein. Die Ergebnisse werden im Gate-Meeting dann mit vorab festgelegten Entscheidungskriterien verglichen und eine Entscheidung getroffen, ob das Projekt fortgesetzt, korrigiert oder abgebrochen wird. Bei der Korrektur wird die vorangegangene Phase erneut durchlaufen und Änderungen an Aktivitäten, Analysen oder den Ergebnissen eingearbeitet. Obwohl Abbildung 14 den Stage-Gate Prozess linear erscheinen lässt, ist der Prozess iterativ. Durch Nacharbeit, der parallelen Ausführung von Aktivitäten und Analysen, sowie Schleifen innerhalb der Phasen des Modells, ist das Stage-Gate Prozessmodell iterativ (vgl. Cooper. 2008, S. 216).

Abbildung 14: Grundmodell des Stage Gate Prozesses



Eigenerstellung in Anlehnung an Cooper. 2008, S. 214; Cooper. 1990, S. 46; Wuest et al. 2014, S. 36

#### 4.2.2 CRISP-DM und DMME

Ein verbreitetes Vorgehensmodell in der Durchführung von KI-Projekten ist der CRISP-DM Prozess (Cross Industry Standard Protocol for Data Mining). Der DMME Prozess (Data Mining Methodology for Engineering) baut auf den Schritten des CRISP-DM Prozesses auf und erweitert das Modell, um es für die Anwendung in technischen Bereichen, wie der Produktion, zu optimieren (vgl. Huber et al. 2019, S. 403). Nachfolgend werden der CRISP-DM und DMME Prozess vorgestellt und Gemeinsamkeiten, Unterschiede und die Bedeutung für das SIA-DT Prozessmodell verglichen.

Der CRISP-DM Prozess ist ein bewährter Standard zur Strukturierung für KI und datenbasierte Projekte. Der CRISP-DM Prozess beschreibt die typischen Arbeitsschritte, die im Rahmen von KI und datenbasierten Projekten durchlaufen werden. Dabei kann der CRISP-DM Prozess zum einen als Methodologie verstanden werden, denn er umfasst die typischen Schritte für KI-Projekte, sowie die Beschreibung der Aufgaben, die mit diesen Schritten verknüpft sind. CRISP-DM ist aber auch ein Prozessmodell, da es den Data-Mining Lebenszyklus darstellt (vgl. IBM. 2021).

Dass CRISP-DM Modell ist nicht Industrie- oder Anwendungsspezifisch. Das Modell kann für verschiedene Anwendungsfälle und in verschiedenen Bereichen, in denen KI-Projekte umgesetzt werden sollen, genutzt werden (vgl. Chapman et al. 2000, S. 3). Diese generalisierte Form ist gleichermaßen die Schwäche des Modells. Das CRISP-DM Modell wird auch zur Systematisierung von Digitalisierungsprojekten im Produktionsumfeld verwendet. Dabei stellt sich die Herausforderung, dass der CRISP-DM durch seine allgemeine Formulierung, nicht alle relevanten Informationen für produzierende Unternehmen bereitstellt. Es wird im CRISP-DM bspw. davon ausgegangen, dass zu Beginn des Prozesses, alle für die Umsetzung des Projektes notwendigen Daten vorhanden sind. Da dies in der industriellen Produktion oftmals nicht der Fall ist, muss der CRISP-DM für einen Einsatz im Produktionsumfeld angepasst werden (vgl. Schock. 2019, S. 4). Der CRISP-DM Prozess wurde von vielen Studien adaptiert und auf bestimmte Anwendungsbereiche oder bestimmte Industrien zugeschnitten, um eine bessere Anwendbarkeit des Prozesses, z. B. in der

---

Produktion, zu erreichen. Der DMME Prozess, der später in diesem Kapitel beschrieben wird, passt den CRISP-DM Prozess an, indem er einige Schritte zum CRISP-DM Prozess ergänzt. So werden Aufgaben, die im Produktionsumfeld bei KI-Projekten durchgeführt werden, besser abgebildet (vgl. Huber et al. 2019, S. 403).

Im ersten Schritt des CRISP-DM Prozesses (vgl. Abbildung 15, Schritt 1) wird das Business Understanding durchgeführt. Im Business Understanding werden die Ziele definiert und wirtschaftliche Anforderungen an das Projekt festgelegt. Die definierten Ziele werden dann in eine Problemformulierung überführt, die durch ein KI oder Data Mining Modell gelöst werden können. Dabei wird auch ein vorläufiger Plan erstellt, wie die Ziele erreicht werden sollen (vgl. Bokrantz et al. 2023, S. 10; Chapman et al. 2000, S. 12; Huber et al. 2019, S. 404).

Der zweite Schritt des CRISP-DM Modells (vgl. Abbildung 15, Schritt 2) ist das Data Understanding. In diesem Schritt werden die Daten gesammelt und deskriptive und explorative Methoden angewendet, um ein besseres Datenverständnis zu erlangen. Die Daten werden zudem auf Datenqualitätsprobleme und eventuelle Ausreißer geprüft. Gleichmaßen erfolgt eine Untergliederung der Daten in Subeinheiten, um eine bessere Übersicht zu erlangen (vgl. Bokrantz et al. 2023, S. 10; Chapman et al. 2000, S. 12–14).

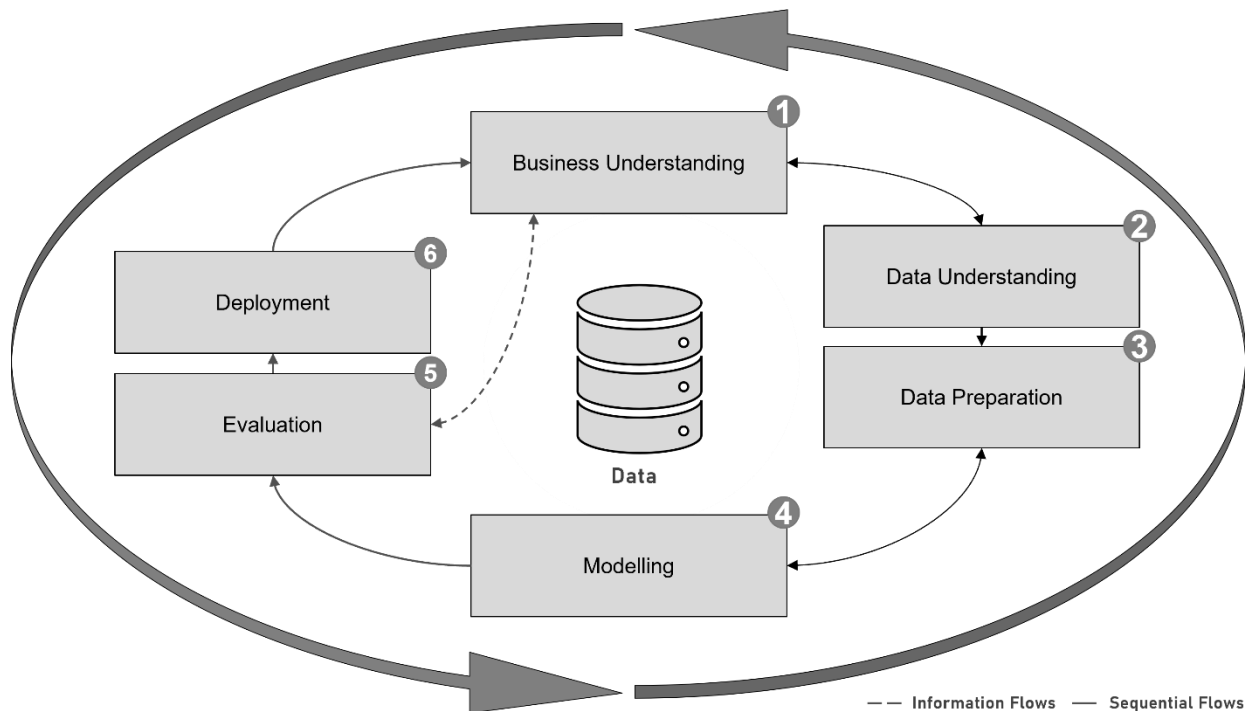
Im dritten Schritt des CRISP-DM Modells, der Data Preparation (vgl. Abbildung 15, Schritt 3), werden die Daten für die Nutzung des Modells vorbereitet. Die Vorbereitung von Produktionsdaten für die Anwendung eines KI-Modells umfasst bspw. die Schritte der Daten-Vorverarbeitung, Daten-Reduktion, die Anwendung von Filtern und die Generierung von Features (Eigenschaften) die durch die Daten abgebildet werden. Zum Teil werden die Daten auch transformiert um diese für den KI-Algorithmus interpretierbar zu machen (vgl. Bokrantz et al. 2023, S. 10; Chapman et al. 2000, S. 13; Huber et al. 2019, S. 404).

Im Schritt der Modellierung (vgl. Abbildung 15, Schritt 4) werden verschiedene technische Modelle und Algorithmen angewendet. Die optimalen Modellparameter werden bestimmt und das am besten geeignete Modell ausgewählt (vgl. Bokrantz et al. 2023, S. 10; Chapman et al. 2000, S. 13).

In der Evaluation (vgl. Abbildung 15, Schritt 5) wird die Umsetzung bewertet. Das erzeugte Modell wird anhand der in früheren Schritten festgelegten Ziele evaluiert. Diese Ziele können je nach zu lösender Problemstellung unterschiedlich sein. Eine Kategorie von Zielgrößen sind bspw. wirtschaftliche Ziele. Wenn mehrere Modelle erstellt wurden, wird die Evaluation genutzt um das am besten geeignete Modell auszuwählen (vgl. Bokrantz et al. 2023, S. 10; Chapman et al. 2000, S. 13) Die Modelle werden zur Evaluation mit Datensätzen evaluiert, die nicht zum Trainieren des Modells genutzt wurden (vgl. Huber et al. 2019, S. 404).

Im letzten Schritt des CRISP-DM Prozesses, dem Deployment (deutsch: Einsatz) wird das Modell, im Falle der Anwendung im produzierenden Gewerbe, in die Produktivumgebung überführt. Dabei wird insbesondere die Anbindung an Datenflüsse und die Aufbereitung und Visualisierung von erzeugten Daten festgelegt (vgl. Bokrantz et al. 2023, S. 10). Der letzte Schritt dient auch dazu, das gesammelte Prozesswissen sowie das Wissen, dass durch die Anwendung der Modelle geschaffen wird, zu strukturieren, zu erfassen und zu organisieren. Die aktive Nutzung der Informationen in Entscheidungsprozessen und die Speicherung der Informationen für eine spätere Nutzung wird sichergestellt (vgl. Chapman et al. 2000, S. 13).

Abbildung 15: CRISP-DM Prozessmodell



Eigenerstellung in Anlehnung an Chapman et al. 2000, S. 12; Clancy et al. 2023, S. 58

Durch die stark gestiegene Verfügbarkeit von Daten in der Produktion, werden neben KI, immer häufiger andere daten-getriebene Technologien, wie das IoT, AR, VR, 3D-Druck und weitere, in der Industrie implementiert. Die Entwicklung neuer und verbesserter Sensorik erlaubt neue Technologie-Anwendungen und bietet für den Einsatz von digitalen Technologien eine qualitativ hochwertige Datengrundlage. Oftmals wird das Potenzial der Daten nicht vollständig genutzt. Systematische Ansätze für die Implementierung von digitalen Technologien helfen, den vollen Nutzen aus den Daten zu schöpfen. Ein bekanntes systematisches Vorgehen, welches besser auf die Anwendung im Produktionsumfeld zugeschnitten ist als der CRISP-DM Prozess, beschreibt der DMME Prozess (vgl. Huber et al. 2019, S. 403).

Der DMME Prozess ist stärker an die spezifischen Anforderungen der Industrie angepasst. Während CRISP-DM heute branchenübergreifend de-facto ein Standard ist, wird der DMME Prozess insbesondere in der Produktionsumgebung eingesetzt. Der DMME Prozess integriert das technische Domänenwissen, wie bspw. die Expertise des Ingenieurwesens, der Informatik und der Data Science (deutsch: Datenwissenschaft). Hierzu ergänzt der DMME Prozess das CRISP-DM Modell um die Aufgaben des technischen Verständnisses und der technischen Realisierung (Abbildung 16, in Schritt 2 zusammengefasst), sowie der technischen Implementierung (Abbildung 16, Schritt 10). Der DMME Prozess baut auf dem CRISP-DM Modell auf. Das CRISP-DM Modell ist im Vergleich zwar ähnlich, aber allgemeiner formuliert und in produzierenden Unternehmen weniger gut anwendbar (vgl. Huber et al. 2019, S. 404).

Um den CRISP-DM an die speziellen Anforderungen der Industrie anzupassen, stellen Huber et al., die Schöpfer des DMME Prozessmodells, in ihrer Arbeit folgende Bedingungen an die Erweiterung des CRISP-DM Prozesses. Während des Prozesses müssen neben den wirtschaftlichen Zielen auch technisch

---

messbare Ziele und technische Implikationen, sowie industriespezifische Anforderungen berücksichtigt werden. Dies kann bspw. mit einem Ishikawa-Diagramm (auch: Fischgrätendiagramm) auf Basis des 5M-Ansatzes (Mensch, Maschine, Material, Methode, Mitwelt) durchgeführt werden. Bei Bedarf ist auch ein 7M-Ansatz (5M, Messbarkeit, Management) anwendbar (vgl. Hochschule Neubrandenburg 2023). Aber auch andere Methoden kommen in Frage (s. Kapitel 2.5). In Bezug auf die technische Entwicklung müssen in einem erweiterten CRISP-DM Modell physikalisch relevante Daten erhoben werden, welche die Implementierung der digitalen Technologie unterstützen oder in späteren Schritten (vgl. Abbildung 16, Schritt 3-12) als Datengrundlage genutzt werden. Für die technische Implementierung muss die Datenerhebung festgelegt und die Sensorik an den Maschinen installiert werden. Eine geeignete Infrastruktur muss hierfür geplant werden. Um die Anforderungen an das CRISP-DM Modell bei einem Einsatz in der Industrie zu erfüllen, wird das CRISP-DM Modell im DMME um drei Arbeitsschritte erweitert (vgl. Huber et al. 2019, S. 406). Die Schritte werden nachfolgend genauer betrachtet.

Das Ziel des technischen Verständnisses (englisch: Technical Understanding) ist die Transformation der festgelegten nicht technischen Ziele in technisch messbare Ziele. Gleichermaßen müssen Anforderungen und technische Implikationen in Ziele überführt werden. Um dies zu erreichen, muss eine Analyse der Systemstruktur, der Prozesse und der zugehörigen Parameter erfolgen. Die technischen Zielgrößen werden definiert. Eine Dokumentation über vorhandenes Wissen und Lösungen zur Erreichung der Ziele wird angelegt. Die relevanten physikalischen Parameter und Randbedingungen werden definiert und das Datenerhebungskonzept wird entwickelt (vgl. Huber et al. 2019, S. 407).

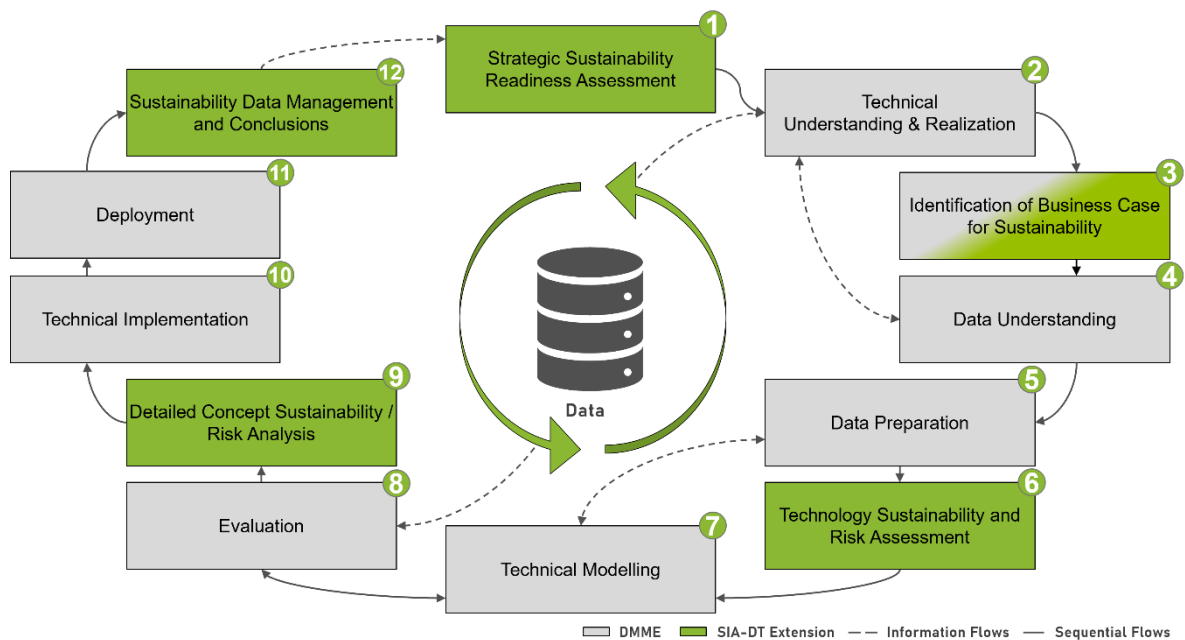
Ziel der technischen Realisierung (englisch: Technical Realization) ist es, die Datenerhebung gemäß dem entwickelten Konzept durchzuführen. Hierzu muss die technische Infrastruktur, wie beispielsweise entsprechende Sensorik, installiert werden. Die resultierenden Daten sollen für die Erreichung der definierten Ziele genutzt werden. Zu diesem Zweck werden die Daten in späteren Schritten analysiert, Fehler werden beseitigt und die Datenqualität abgeschätzt (vgl. Huber et al. 2019, S. 407).

Das Ziel der technischen Implementierung (englisch: Technical Implementation) ist die digitale Technologie mit Echtzeitdaten aus der Produktion zu testen. Dazu muss das Konzept der technischen Realisierung aus dem Schritt der technischen Bewertung und Realisierung in eine echtzeitfähige Infrastruktur überführt werden. Die Sensorik wird auf die Fähigkeit überprüft, kontinuierliche Daten über einen langen Zeitraum zu streamen. Hierzu muss das System bspw. Lücken in der Stromversorgung und Verbindungsverluste zum Netzwerk selbst überbrücken können. Eine Sicherstellung des Betriebs des Systems kann bspw. durch Redundanzen mittels doppelter Sensoren erreicht werden. Gleichermaßen muss die Softwareanbindung der Technologie und die Speicherung der Daten sichergestellt werden (vgl. Huber et al. 2019, S. 407).

In der Forschung wird empfohlen, dass auch der DMME Prozess weiterentwickelt werden sollte. Huber et al. zeigen an einer Fallstudie, dass der DMME Prozess gut geeignet ist, ein systematisches Vorgehen zu erzielen. Die Einbeziehung weiterer nichttechnischer Perspektiven ist dennoch notwendig (vgl. Huber et al. 2019, S. 408). Diese Arbeit wird mit dem SIA-DT Prozessmodell, welches den DMME-Ansatz um vier Schritte ergänzt und für einzelne Schritte Anpassungen vorschlägt, eine Nachhaltigkeitszielorientierung bei der Implementierung von digitalen Technologien einführen. Die Abbildung 16 zeigt, dass zum DMME die Arbeitsschritte der strategischen Bewertung des Nachhaltigkeitsreifegrads und -potenzials (1), des

Business-Case für Nachhaltigkeit (3), der Nachhaltigkeits- und Risikoanalyse von Technologieoptionen (6), der detaillierten Bewertung des technischen Konzepts der ausgewählten Technologie auf Nachhaltigkeit und Risiken (9) sowie der kontinuierlichen Datenerfassung und Speicherung der Nachhaltigkeitsdaten (12) ergänzt werden. Die Abbildung 16 stellt ebenfalls dar, wie der SIA-DT in der bekannten Darstellungsweise des CRISP-DM und DMME Prozesses dargestellt werden kann. Die Abbildung zeigt den starken Daten-Bezug des DMME Prozesses, der auch für das SIA-DT Prozessmodell gilt. Ebenfalls ist zu sehen, dass einige Aufgaben, die nicht direkt über Sequenzflüsse verbunden sind, über Informationsflüsse verknüpft sind. Das nachfolgende Kapitel 4.3 wird die exklusiven Arbeitsschritte des SIA-DT Prozesses im Detail beschreiben. Auch wenn die Abbildung 16 eine gute Vergleichbarkeit mit dem CRISP-DM oder dem DMME Prozessmodell ermöglicht, wird das SIA-DT Prozessmodell bei weiteren Betrachtungen als Stage-Gate dargestellt um die Phasen des SIA-DT Prozesses und die Bedeutung der (Quality) Gates hervorzuheben.

**Abbildung 16: DMME und SIA-DT**



Quelle: Eigenerstellung in Anlehnung an Huber et al. 2019, S. 406

### 4.3 SIA-DT Definition und Struktur

SIA-DT ist das Akronym für **Sustainability Integrated Approach for Digital Technologies**. Das SIA-DT Prozessmodell ist ein Prozessmodell für das Projektmanagement von Digitalisierungsprojekten, bei denen digitale Technologien im Produktionsumfeld implementiert werden. Anders als bei bestehenden Modellen, wird im SIA-DT Prozessmodell in jeder Projektphase, durch die Ergänzung weiterer nachhaltigkeitsbezogener Aufgaben, ein Bezug zur Nachhaltigkeitsstrategie bzw. konkreten Nachhaltigkeitszielen der Unternehmen hergestellt. Das SIA-DT Prozessmodell, welches im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und mittels Experten/Expertinnen-Interviews überprüft wird, unterstützt Unternehmen dabei, den Arbeitsfluss von Digitalisierungsinitiativen zur Erreichung und Verbesserung von Nachhaltigkeitszielen zu

---

strukturieren und Ressourcen, aus der Perspektive des Nachhaltigkeits- und Digitalisierungsmanagements, begründet in bestimmte Produktionsbereiche und Technologien zu lenken. Dadurch werden neben der ökonomischen Verbesserung auch ökologische und soziale Ziele erreicht.

Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal des SIA-DT zu den bisherigen Prozessmodellen, ist die Einführung zusätzlicher Arbeitsschritte, die Gliederung des Prozessmodells in Phasen und die Einführung von Entscheidungspunkten. Das SIA-DT Prozessmodell wird nach dem Vorbild des Stage-Gate Prozesses entworfen. Um die Anwendung des SIA-DT in verschiedenen Unternehmen zu ermöglichen, werden keine Vorgaben zur Anwendung bestimmter Methoden und Analysen innerhalb der einzelnen Phasen gemacht. Die einzelnen Aufgaben können je nach den im Unternehmen vorhandenen Methodenkompetenzen, Vorlagen und Standards ausgestaltet werden. Die Ziele der im SIA-DT ergänzten durchzuführenden Aufgaben sind in Kapitel 4.6 definiert und unternehmensübergreifend gültig. In Kapitel 4.6 werden die Design-Empfehlungen aus Tabelle 10 aufgegriffen, anhand derer die Einführung des jeweiligen SIA-DT Arbeitsschritts begründet wird. Um den SIA-DT Prozess für ein besseres Verständnis zu konkretisieren, werden Empfehlungen für die Anwendung bestimmter besonders oft eingesetzter Managementwerkzeuge ausgesprochen. Diese Werkzeuge werden in Kapitel 2.5 detailliert erklärt. Das Modell ist in verschiedenen Unternehmen der produzierenden Industrie anwendbar. Nachfolgend wird auf die Struktur und die Eingliederung des SIA-DT in bestehende Standards zur Systematisierung von Nachhaltigkeitserreichung eingegangen.

#### **4.3.1 Einbettung ins Qualitätsmanagementsystem**

Die wichtigsten Standards für die Systematisierung von Nachhaltigkeit werden in Kapitel 2.3 und Kapitel 2.3.3 beschrieben. Der Norm DIN EN ISO 14001 kommt in den meisten industriellen Unternehmen eine besondere Bedeutung zu. Die wichtigsten Gründe hierfür sind in Kapitel 2.3.6 aufgeführt. Im Rahmen des Designs des SIA-DT Prozessmodells werden Unternehmen, die nach der Norm DIN EN ISO 14001 zertifiziert sind, als besonders geeignet für die Implementierung des SIA-DT Prozesses betrachtet.

Die Umsetzung der Norm DIN EN ISO 14001 erfordert ein systematisches Denken im Bezug zur Nachhaltigkeitsverbesserung und der Erreichung der Nachhaltigkeitsziele. Außerdem ist ein Ziel der UMS ein besseres Management der Ressourcen (s. Kapitel 2.3.6). Dieses systematische Denken ist auch für die erfolgreiche Umsetzung des SIA-DT Prozesses der wichtigste Erfolgsfaktor, da der SIA-DT, aus einer technologiegetriebenen Perspektive, ebenfalls zur Systematisierung der Erreichung von Nachhaltigkeitszielen genutzt wird. Der SIA-DT Prozess lenkt Ressourcen begründet in bestimmte Produktionsbereiche und Technologien und trägt diesbezüglich zum Ziel des UMS bei.

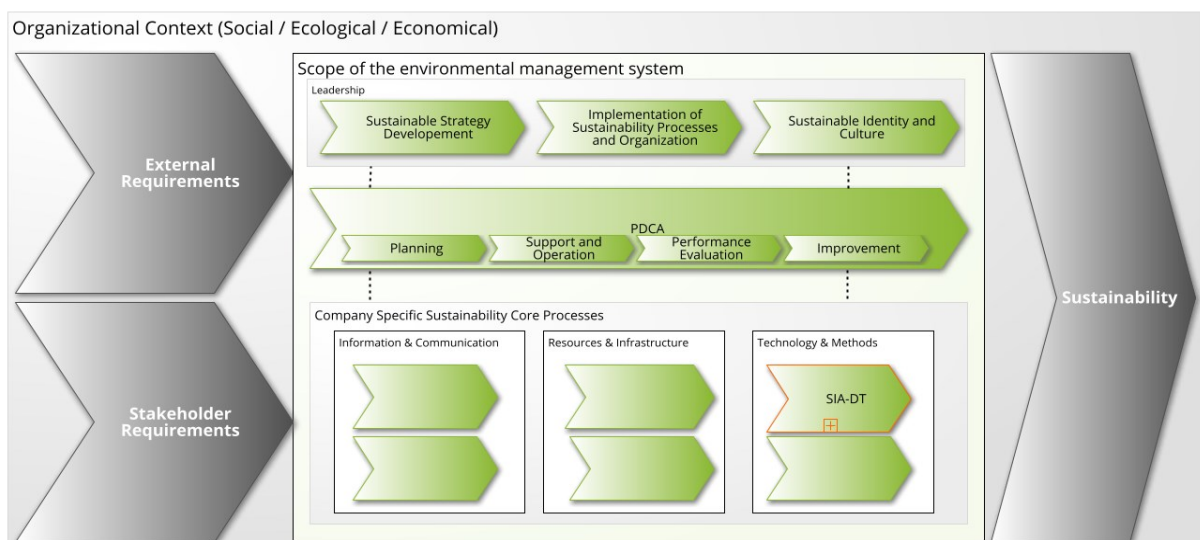
Gleichermaßen ist das UMS der Norm DIN EN ISO 14001 prozessorientiert. Die Akzeptanz für Nachhaltigkeit ist in Unternehmen, die nach der DIN EN ISO 14001 zertifiziert sind, ausgeprägt, da eine systematische Denkweise bezogen auf Nachhaltigkeit vorhanden ist (s. Kapitel 2.3.6). Auch der SIA-DT Prozess ist prozessorientiert und baut auf dem Gedanken der kontinuierlichen Verbesserung auf. Eine hohe Akzeptanz gegenüber Prozessen zur Steigerung der Nachhaltigkeitsleistung ist eine Voraussetzung für die erfolgreiche Umsetzung des SIA-DT im Unternehmen. Da Unternehmen die nach der Norm DIN EN 14001 zertifiziert sind, im Rahmen der Audits nachweisen müssen, dass Ressourcen systematisch für Initiativen zur Nachhaltigkeitssteigerung eingesetzt werden, ist das SIA-DT Prozessmodell eine sinnvolle Ergänzung des

UMS. Auf Basis des SIA-DT Prozessmodells können Unternehmen, welche durch die Implementierung eines UMS nach DIN EN ISO 14001 bereits Führungs-, Verbesserungs- und unternehmensspezifische Kernprozesse für das Nachhaltigkeitsmanagement etabliert haben, eine aus der Nachhaltigkeitsperspektive bessere Verteilung der Ressourcen bei Digitalisierungsprojekten erreichen.

Unternehmen, die nach DIN EN ISO 14001 zertifiziert sind, müssen einen Prozess zur kontinuierlichen Verbesserung aufweisen. Auch Prozesse zur Strategieentwicklung und die Implementierung einer Unternehmenskultur, die auf Nachhaltigkeit ausgerichtet ist, gehören zur Implementierung eines UMS nach der Norm DIN EN ISO 14001. Unternehmen, die nach der Norm DIN EN ISO 14001 zertifiziert sind, besitzen das Wissen, das für die Umsetzung des SIA-DT notwendig ist. Gleichmaßen wird in Unternehmen, die nach der Norm zertifiziert sind, eine kontinuierliche Verbesserung der Prozesse zur Erreichung von Nachhaltigkeit angestrebt. Die Schaffung von Standardprozessen zur kontinuierlichen Verbesserung ist ein Kern der Umsetzung eines UMS. Unternehmen die zusätzlich weitere Standards, bspw. die Norm DIN EN ISO 26000 zum Management der CSR umsetzen, können insbesondere die Steuerung der ökologischen und sozialen Nachhaltigkeit weiter steigern (vgl. Abbildung 17; s. Kapitel 2.3.6).

Das SIA-DT Prozessmodell setzt diese Eigenschaften voraus. So baut die erste SIA-DT Phase darauf auf, dass das Unternehmen im Rahmen der Nachhaltigkeitsstrategie strategische Ziele festgelegt hat. Im SIA-DT werden diese Ziele in operative Ziele (mit Methoden wie den Reifegradmodellen) bzw. Kriterien überführt. Außerdem wird vorausgesetzt, dass zertifizierte Unternehmen Nachhaltigkeitsziele aktiv durch den Einsatz von digitalen Technologien erreichen oder verbessern möchten. Die Akzeptanz und das Verständnis für Prozesse zur Verbesserung der Nachhaltigkeit sind essenziell. Unternehmen, die nach der Norm DIN EN 14001 zertifiziert sind, besitzen bereits Rollen und Funktionen, die auch im SIA-DT Prozess mitwirken. Dies sind bspw. Rollen des Nachhaltigkeitsmanagements. Die Bedeutung der DIN EN ISO 14001 wird auch in den Experten/Expertinnen-Interviews überprüft (s. Kapitel 5).

**Abbildung 17:** Einbettung des SIA-DT in ein UMS nach der Norm DIN EN ISO 14001



Quelle: Eigenerstellung in Anlehnung an DIN EN ISO 14001:2015, S. 17; Schmitt und Pfeifer. 2015, S. 125



---

### 4.3.2 DMME-Schritte im SIA-DT

Der SIA-DT Prozess baut auf den DMME-Schritten auf, welche in Kapitel 4.2.2 beschrieben sind. Durch die Nutzung der DMME Prozessschritte, wird eine Anwendungsorientierung bei der Implementierung digitaler Technologien in der Produktion im SIA-DT Prozess erzielt. Der erste Schritt des DMME Prozesses, das Business Understanding, wird im SIA-DT Prozess erweitert und erfolgt nicht zu Beginn des Prozesses. Der SIA-DT Prozess beginnt mit der Analyse des strategischen Nachhaltigkeitsreifegrads (s. Kapitel 4.6.1). Im SIA-DT Prozessmodell wird das Business Understanding zum Business Case for Sustainability, wie in Kapitel 4.6.2 beschrieben, angepasst.

Die zweite Aktivität im DMME Prozess, das Technical Understanding, wird mit dem dritten Schritt, der Technical Realization zusammengelegt. Die Zusammenlegung erfolgt, da beide Schritte ähnliche Ziele verfolgen. Bei der Aufgabe des technischen Verständnisses wird der im ersten SIA-DT Schritt ausgewählte Produktionsbereich auf die technischen Gegebenheiten untersucht. Es wird bspw. die im Produktionsbereich vorhandene Messtechnik untersucht oder die technische Bewertung der vorhandenen Datengrundlage des Bereichs durchgeführt. Wird in diesem Zuge identifiziert, dass für die Umsetzung einer digitalen Technologie keine ausreichende Datenbasis besteht oder keine Messtechnik vorhanden ist, um diese Datengrundlage zu erfassen, wird in der technischen Realisierung diese Datengrundlage geschaffen. Inhaltlich sind die Schritte im SIA-DT und DMME gleich. Der vierte Schritt des DMME Prozesses, das Data Understanding und der fünfte Schritt des DMME, die Data Preparation sind inhaltlich unverändert. Wie auch beim DMME Prozess werden im SIA-DT die vorhandenen oder erhobenen Daten verarbeitet und organisiert, um ein besseres Verständnis für die Daten zu erlangen. Anschließend werden die Daten für die Nutzung als Grundlage des Betriebs der digitalen Technologien vorbereitet. Der Unterschied der Data Preparation im SIA-DT besteht darin, dass die Daten lediglich dahingehend bewertet werden, für welche Technologie diese am besten geeignet sind und mit welchem Aufwand sich die Daten für den Einsatz dieser Technologien vorbereiten lassen. Die eigentliche Vorbereitung der Daten erfolgt später. Die Ergebnisse dieses Schritts fließen in den SIA-DT Schritt sechs ein (s. Kapitel 4.6.3).

Die DMME Schritte sieben und acht (Technical Modeling und Evaluation) werden ebenfalls leicht angepasst. Im SIA-DT Prozess wird erst im Technical Modelling die tatsächliche Vorbereitung des Datensatzes für die ausgewählte Technologie durchgeführt und ein technisches Konzept, das Modell oder der Prototyp, werden in der Produktionsumgebung getestet. Im Bewertungsschritt des DMME Prozess (Evaluation) wird das Modell auf die Erfüllung der zuvor definierten Ziele überprüft. Dies ist auch im SIA-DT Prozess der Fall. Im SIA-DT wird der Fokus in diesem Schritt jedoch auf die technischen Parameter gelegt, wie die technische Umsetzung des Konzepts und die Anbindung der Technologie an die bestehenden Informationssysteme. Erst in SIA-DT Schritt neun wird überprüft welche ökonomischen, wirtschaftlichen und sozialen Ziele das technische Konzept erfüllt bzw. verbessert (s. Kapitel 4.6.4). Die Schritte acht und neun des DMME Prozesses sind im SIA-DT inhaltlich gleich. Bei der technischen Implementierung wird die Technologie an die Schnittstellen der Produktionsumgebung angeschlossen. Im Deployment Schritt wird der operative Betrieb der digitalen Technologie überwacht. Die Erfassung und Speicherung der Nachhaltigkeitsdaten wird im SIA-DT im nachfolgenden Schritt der kontinuierlichen Datenerfassung und Speicherung der Nachhaltigkeitsdaten realisiert (s. Kapitel 4.6.5). Die Abbildung 18 stellt die Anordnung der DMME und der im SIA-DT hinzugefügten Schritte übersichtlich dar.

---

### 4.3.3 Stage-Gate als Grundmodell des SIA-DT

Als Grundmodell für die Entwicklung des SIA-DT Prozesses wird neben dem DMME Modell das Stage-Gate Prozessmodell verwendet. Das Stage-Gate Modell macht keine inhaltlichen Vorgaben, sondern bietet das strukturelle Grundgerüst für den Ablauf des Managementprozesses. Die wesentlichen Vorteile, die der Stage-Gate Prozess bietet, werden in Kapitel 4.2.1 vorgestellt. Die inhaltliche Gestaltung des SIA-DT Prozesses baut auf den Arbeitsschritten des CRISP-DM und des DMME Prozesses auf (s. Kapitel 4.3.2).

Das Grundgerüst des SIA-DT Prozesses verfügt über fünf Phasen und vier Gates. Die Einteilung der Phasen erfolgt nach der inhaltlichen Ähnlichkeit der Aktivitäten innerhalb der Phasen. Die Abbildung 18 zeigt den SIA-DT als Stage-Gate Prozessmodell. Die erste Phase schließt mit der strategischen Analyse von Nachhaltigkeitsreifegrad und Nachhaltigkeitspotenzialen für verschiedene Bereiche in der Produktion ab. Das erste Gate des SIA-DT Prozesses, muss Kriterien enthalten, anhand derer entschieden werden kann, ab wann strategische Kriterien wie eine geringer Nachhaltigkeitsreifegrad in einem Bereich ausreichen, um ein Digitalisierungsprojekt zur Verbesserung des Reifegrades für diesen Bereich zu initiieren. Eine Lösung ist die Nutzung von quantitativen Schwellwerten, mit denen quantitative Reifegrade für verschiedene Bereiche, die durch Anwendung eines Reifegradmodells (s. Kapitel 4.6.1) in der ersten Phase ermittelt werden, verglichen werden.

Die zweite Phase des SIA-DT Modells befasst sich mit der Ermittlung der technischen Gegebenheiten des ausgewählten Bereichs. Die Daten des Bereichs sowie die durchgeführten Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen werden im zweiten Gate mit den Entscheidungskriterien verglichen. Auch hier können Schwellwerte wie ein minimal zu erreichender Zinsfuß oder eine Mindestforderung an prozentualer Verbesserung einer Nachhaltigkeitskennzahl im ausgewählten Strategiebereich, für die Entscheidung genutzt werden.

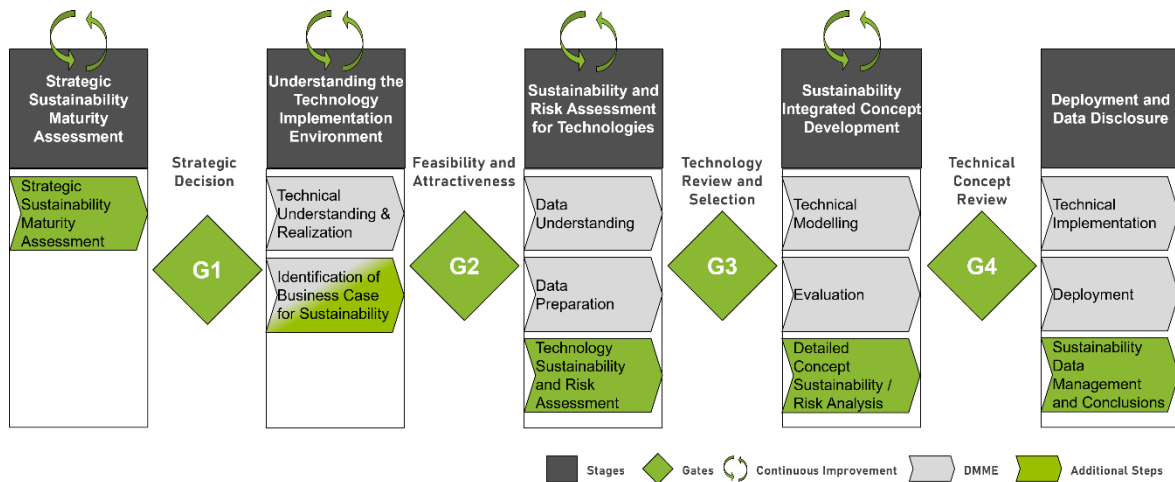
In der dritten Phase werden für die einsetzbaren Technologieoptionen, auf Grundlage der erhobenen Daten und nach Durchführung des Data Understanding und der Data Preparation, ausführliche Vergleiche der Technologieoptionen auf Nachhaltigkeitspotenziale und Risiken durchgeführt. Das Ziel der dritten SIA-DT Phase ist die, in dem ausgewählten Bereich durch die Umsetzung des Messkonzepts, erhobenen Daten für den Vergleich verschiedener Technologien zu nutzen. Im dritten Gate wird eine Entscheidung bezüglich der am besten geeigneten Technologie getroffen.

In der vierten Phase des SIA-DT, wird das technische Konzept, das Modell bzw. der Prototyp der Technologie eingeführt und bewertet. Dabei wird auch am Ende dieser Phase eine Analyse durchgeführt. Diese Analyse umfasst ebenfalls eine Risiko- und Nachhaltigkeitsanalyse. Bei dieser Analyse wird das technologische Konzept, das Modell oder der Prototyp untersucht. In dieser Phase wird ermittelt, ob die Umsetzung der nach Phase drei ausgewählten Technologieoption, die zu Beginn des Projektes definierten Ziele erfüllt und die Problemstellung löst. Im vierten Gate des SIA-DT Prozesses wird auf Grundlage der Informationen der vierten Phase entschieden, ob das technische Konzept, das Modell oder der Prototyp in die Produktivumgebung überführt werden soll. Wird das Projekt fortgeführt folgt die letzte Phase des SIA-DT.

In der letzten Phase wird das technische Konzept in der Produktivumgebung umgesetzt. Hierzu erfolgt die technische Implementierung und das Deployment. Die letzte Phase endet mit der Einführung einer kontinuierlichen Datenerfassung der Daten der implementierten digitalen Technologie und der Anbindung der Nachhaltigkeitsdaten, die mit der Technologie erzeugt werden, an die relevanten Datenspeichersysteme

für Nachhaltigkeitsdaten des Unternehmens. Die Nachhaltigkeitsdaten werden anschließend durch angelegte Prozesse, wie den Controlling-Prozessen und Prozessen des Berichtswesens, weiterverarbeitet.

**Abbildung 18:** SIA-DT Prozessmodell als Stage Gate dargestellt



Quelle: Eigenerstellung

Damit der SIA-DT Prozess erfolgreich angewendet werden kann, müssen einige wichtige für die Anwendung von Stage-Gate-Prozessen allgemein gültige Regeln beachtet werden. Wenn das Projekt, welches mit dem SIA-DT Prozess geleitet werden soll, persönlich von hohen Führungspositionen (englisch: Executives) betreut wird, darf das Projekt keine Sonderbehandlung bekommen. Steckenpferd-Projekte von hohen Führungspositionen, die ein abweichendes Projektmanagement durchlaufen, neigen oftmals zum Fehlschlag. Es muss sichergestellt werden, dass alle Projekte dem Prozess folgen und einheitlich nach den festgelegten Gate-Kriterien bewertet werden. Gate-Meetings dürfen nicht Last Minute abgesagt werden und das gesamte Projektteam muss anwesend sein. Die Gate-Kriterien müssen anspruchsvoll sein. Es dürfen keine Kriterien gewählt werden, die einfach zu erfüllen sind. Diese Anforderung an Gates wird als Gate mit Zähnen (englisch: Gate-with-tooth) bezeichnet. Die Entscheidung über Fortsetzung, Korrektur oder Projektstopp muss während des Gate-Meetings getroffen werden und sich an den festgelegten Kriterien orientieren. Die Entscheidung darf nicht von einer einzelnen Person oder auf Basis einer Einschätzung getroffen werden sondern muss faktenbasiert sein (vgl. Cooper. 2008, S. 219).

#### 4.3.4 Kontinuierliche Verbesserung

Die kontinuierliche Verbesserung steht im Kern vieler Managementsysteme. Kontinuierliche Verbesserung beschreibt die fortlaufende Weiterentwicklung von Produkten, Dienstleistungen oder Prozessen durch die Einführung und Absicherung einer inkrementellen oder sprunghaften Verbesserung. Verbreitete Methoden der kontinuierlichen Verbesserung sind Six Sigma, Total Quality Management (TQM) und Lean Management. Am weitesten verbreitet und teilweise in den genannten Methoden integriert, ist der PDCA-Zyklus, auch Deming Zyklus genannt. Der Zyklus besitzt vier Phasen. In der Plan Phase wird identifiziert, welche Möglichkeiten zur Verbesserung bestehen und Maßnahmen zur Umsetzung dieses Potentials geplant. In der zweiten Phase, der Do Phase, werden die Änderungen eingeführt. In der Check Phase wird überprüft, ob die eingeführten Maßnahmen wirksam sind oder Änderungen an den Maßnahmen

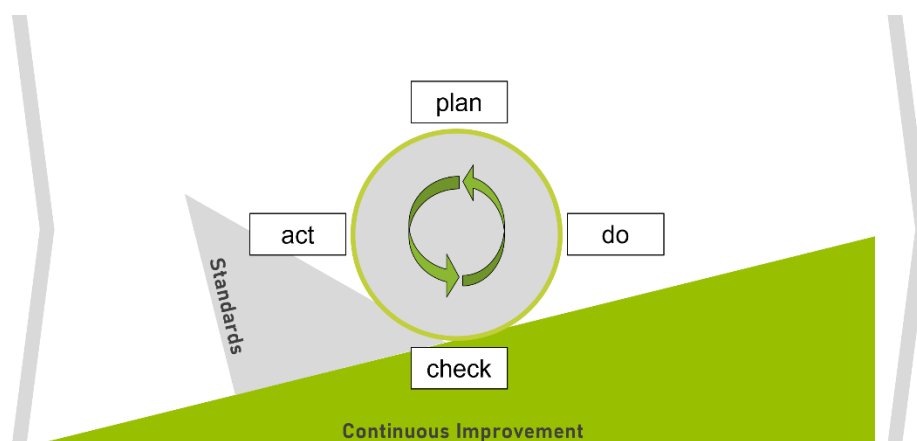
durchgeführt werden müssen. In der Act Phase werden die Änderungen, wenn sich diese als erfolgreich erweisen, als neue Standards eingeführt. Dadurch kann das neue und verbesserte Niveau abgesichert werden (vgl. ASQ. 2023).

Die Abbildung 19 zeigt den Wirkmechanismus der kontinuierlichen Verbesserung in grafischer Form. Beispielsweise kann die Verbesserung eines Geschäftsprozesses, bei dem Verbesserungspotenziale oder Nachbesserungen durchgeführt werden müssen, betrachtet werden. Die Verbesserung des Geschäftsprozesses wird erreicht, indem erfolgreich geplante und umgesetzte Maßnahmen als neuer Standard für diesen Geschäftsprozess definiert werden. Durch den Standard ist das neue Qualitätsniveau des Prozesses abgesichert.

Im produzierenden Gewerbe ist der PDCA-Zyklus sehr bekannt. Neben dem Einsatz des PDCA-Zyklus innerhalb der Qualitäts- und Umweltmanagementsysteme (s. Kapitel 2.3.6) wird er auch im Konzept der Lean Production als Methode vorgestellt, um eine kontinuierliche Verbesserung von Produktionsprozessen zu erreichen (vgl. Milosevic et al. 2021, S. 209). Der PDCA-Zyklus ist einfach anzuwenden und lässt sich je nach Bedarf erweitern. Es können sowohl Abläufe und Prozesse als auch persönliche Aufgaben mit dem PDCA-Zyklus verbessert werden. Der zyklische Aufbau des PDCA sorgt für eine wiederholte Analyse und kontinuierliche Verbesserung. Insbesondere wiederkehrende Fehler können durch den PDCA identifiziert und beseitigt werden (vgl. REFA 2023).

Der PDCA-Zyklus findet, in Kombination mit anderen Methoden, bereits Anwendung bei der Bewertung und Verbesserung der Nachhaltigkeit von Produktionsprozessen. Die von Garza-Reyes et al. durchgeführte Forschung verbessert die E-VSM Methode durch den Einsatz des PDCA-Zyklus. Abfälle und Verschwendung in Produktionsprozessen werden so besser vermieden (vgl. Garza-Reyes et al. 2018, S. 373).

**Abbildung 19:** Wirkungsweise der kontinuierlichen Verbesserung



Eigenerstellung in Anlehnung an SixSigma Europe 2023; St. Galler Business School 2023

Bei der Umsetzung eines Umweltmanagementsystems wie bspw. dem UMS der DIN EN ISO 14001 steht der Gedanke des PDCA-Zyklus im Kern des UMS (vgl. Abbildung 6). In UMS werden zunächst Maßnahmen geplant, um die Umweltleistung zu steuern und die Prozesse zur Steuerung zu verbessern. Es werden Ziele der Umweltpolitik im Unternehmen definiert (bspw. Umweltkennzahlen) und geeignete Maßnahmen entwickelt, um diese zu erreichen. Danach erfolgt die Umsetzung in der Do-Phase. In der Check-Phase wird

---

die Wirksamkeit der Maßnahmen überprüft. In der Act-Phase werden Verbesserungen und neue Standards definiert, die das System verbessern. Diese Phasen sind zyklisch und führen daher zu einer kontinuierlichen Verbesserung der Prozesse des Umweltmanagements (vgl. VOREST AG. 2023b).

Der SIA-DT Prozess greift auf das Wissen von Unternehmen in der kontinuierlichen Verbesserung zurück. Unternehmen, die ein zertifiziertes UMS nach der Norm DIN EN ISO 14001 besitzen, verfügen auch über Prozesse zur kontinuierlichen Verbesserung (s. Kapitel 2.3.6; Kapitel 4.3.1). Im SIA-DT Prozess wird nach jeder Projektphase ein Entscheidungspunkt erreicht. Beispielhaft wird folgend das zweite Gate zur Erklärung der Integration des PDCA in den SIA-DT Prozess genutzt.

In Abbildung 20 ist der SIA-DT in der BPMN 2.0 Modellierungskonvention dargestellt. Nach jeder Phase wird an einem Gateway über die Projektfortführung, den Projektabbruch oder Nachbesserung entschieden. Wird am zweiten Gate festgestellt, dass die in Phase zwei zur Verfügung stehenden oder erhobenen Daten bzw. Informationen für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit und Attraktivität nicht ausreichen, muss Nacharbeit geleistet werden, um die Informationen zu verbessern. Der PDCA-Prozess des Unternehmens wird initiiert, falls das Unternehmen für den PDCA-Prozess Standards etabliert hat. Falls dies nicht der Fall ist (z. B. in nicht zertifizierten Unternehmen) können andere Prozesse der kontinuierlichen Verbesserung, die im Unternehmen existieren, genutzt werden. Das Unternehmen kann auch ohne bereits existierende Kenntnisse zum PDCA-Prozess die Phasen Plan, Do, Check und Act zur Orientierung nutzen.

Nachfolgend ein Beispiel zur Veranschaulichung: Wird ein Verbesserungspotenzial am zweiten Gate des SIA-DT Prozessmodells aufgedeckt, kann die Entscheidung für Nachbesserung getroffen werden. Es werden Maßnahmen zur Anpassung der zweiten Phase, des technischen Verständnisses, der technischen Realisierung (z. B. des Messkonzeptes) und der Business-Case Erstellung geplant und umgesetzt. Die Wirksamkeit der Maßnahmen wird überprüft und die Maßnahmen werden zum neuen Standard, wenn diese Erfolg zeigen. Bei einem weiteren Durchlauf des SIA-DT Prozesses wird nach dem neuen Standard vorgegangen. Sollten die Ergebnisse am zweiten Gate wieder unzureichend sein, kann erneut nachgebessert werden oder eine Entscheidung zum Projektabbruch getroffen werden. Dieser zyklische Kreislauf ist an jedem Gate möglich.

#### **4.4 SIA-DT Prozessmodellierung in BPMN 2.0**

Dieses Kapitel befasst sich mit der Erklärung der Modellierungselemente des SIA-DT Prozess in der BPMN 2.0 Prozessmodellierungskonvention. Die inhaltliche Erklärung der Prozessphasen und -schritte wird in den Kapiteln 4.3.2 bis 4.3.4 und 4.6 durchgeführt. Das BPMN 2.0 Prozessmodell des SIA-DT ist in Abbildung 20 dargestellt und bietet eine detaillierte Aufschlüsselung von Sequenz- und Informationsflüssen sowie Prozessbeteiligten und Verantwortlichkeiten. Die Vorteile, die eine Modellierung des SIA-DT Prozesses in der BPMN 2.0 Modellierungskonvention bringen, sind in Kapitel 4.1 erläutert. Nachfolgend werden in Tabelle 9 die Modellierungselemente, die im BPMN 2.0 Prozessmodell des SIA-DT genutzt werden, genauer erklärt.

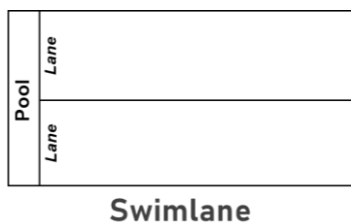
Die Phasen und Schritte des Stage-Gate Prozessmodells sind in der BPMN 2.0 Darstellung gleich. Der Unterschied zwischen Stage-Gate und BPMN 2.0 Darstellung liegt im Detailierungsgrad der Sequenz- und Informationsflüsse. Außerdem wurde das BPMN 2.0 Prozessmodell durch Simulation mit SAP Signavio auf

korrekte Modellierung überprüft. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass in Abbildung 20 schlüssig nachzuvollziehen ist, in welchen Fällen die Unterprozesse der kontinuierlichen Verbesserung und der Bewertung des Projektfehlschlags angesprochen werden. Außerdem wird ersichtlich welche IT-Systeme, Datenspeicher und weitere Prozessbeteiligte bei bestimmten Aufgaben hinzuzuziehen sind. Gleichermaßen ist dargestellt, welche Schritte bestimmten Rollen zugeordnet werden.

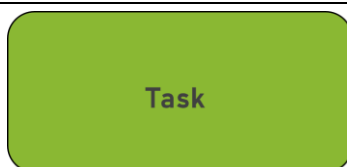
Der Unterprozess der kontinuierlichen Verbesserung wird in Kapitel 4.3.4 erläutert. Der Unterprozess der Bewertung des Projektfehlschlags (vgl. Abbildung 20, Schritt: Assess Project Failure) wird in dieser Arbeit nicht näher betrachtet. Der Unterprozess ist dargestellt, da aus der Literaturrecherche hervorgeht, dass an jedem Gate neben der Projektfortführung oder der Entscheidung für Nacharbeit bzw. Nachbesserung auch der Projektabbruch beschlossen werden kann. Wird das Projekt abgebrochen wird in Unternehmen der Prozess zum Projektabschluss angestoßen. Alle Unternehmen die beim Projektmanagement nach der dafür vorgesehenen Norm DIN 69901-2 vorgehen, müssen einen solchen Projektabschluss durchführen. Dabei wird das Projekt formal beendet. Hierzu wird der Projektabschlussbericht erstellt, Nachkalkulationen getätigt und eine Erfahrungssicherung durchgeführt (vgl. Albrecht et al. 2016, S. 352). Im SIA-DT BPMN 2.0 Prozessmodell ist dieser Unterprozess mit einer Datenbank assoziiert, da eine digitale Erfahrungssicherung durchgeführt wird.

Die Darstellung der Prozesse der kontinuierlichen Verbesserung und der Bewertung des Projektabbruchs als zusammengefasste Unterprozesse wird gewählt, da beide Prozesse in vielen Unternehmen standardisiert sind. Diese beiden Prozesse sind zu umfangreich, um sie detailliert im SIA-DT Prozessmodell darzustellen. Auch aus diesem Grund sind diese als zusammengefasste Unterprozesse modelliert. Ein letzter wichtiger Punkt ist die Bedeutung der beiden Prozesse. Für das SIA-DT Prozessmodell müssen keine Anpassungen am unternehmensspezifischen Prozess der kontinuierlichen Verbesserung und dem Prozess des Projektabschlusses durchgeführt werden. Auch aus diesem Grund können bestehende Standardprozesse genutzt werden.

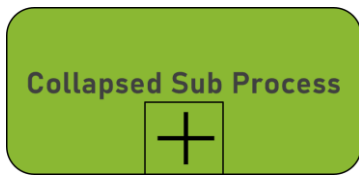
**Tabelle 9:** Zur Modellierung des SIA-DT Prozesses verwendete BPMN 2.0 Elemente



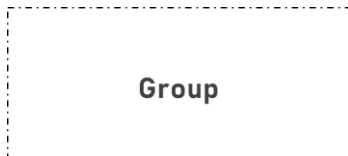
Pools in BPMN 2.0 represent an organizational unit with clear borders and attributes. This could be a company or an independent system. The pool in the SIA-DT BPMN 2.0 model represents the industrial company in which the process is applied. Lanes represent roles, responsibilities, or persons. In the SIA-DT BPMN 2.0 model the lanes represent the participants in the process. All lanes within a pool can interact with each other without restrictions. Within a BPMN 2.0 model multiple swim lanes (pool with lanes) can exist when modelling processes across company borders.



A task is a specified unit in the workflow of a process. A task is always entitled to a specific lane (role or person). The task is formulated as an activity. This is shown by formulating the task in the following way: verb + object.



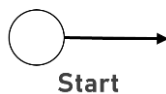
A collapsed task is a specified unit in the workflow. A collapsed task is always entitled to a specific lane. The collapsed task represents a sub process. In the SIA-DT BPMN 2.0 process model a collapsed sub process is used for both, the continuous improvement process, and the assessment of project failure. These processes are company specific, and the steps of this processes are not explained in this thesis. The activities of this sub processes are only addressed in certain cases throughout the SIA-DT and therefore shown as collapsed sub processes.



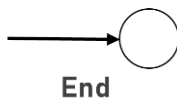
A group of related tasks is visualized as shown on the left. The grouping of tasks shows that certain tasks belong to a specific workflow. In the SIA-DT BPMN 2.0 process model the group element is used to show which steps of the SIA-DT process belong to the DMME process as well.



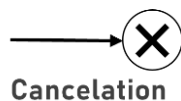
The exclusive gateway is used to show that the sequence flow is split into multiple flows. The flow follows the way which criteria is fulfilled. The SIA-DT process model uses the exclusive gateways e.g., to illustrate the stop, go or adjust decision at the four gates of the process. When the gateway is used to merge flows, the process flow waits only until one flow arrives the gateway and continues.



The element shown on the left is the standard starting point element. It shows the start event that triggers the process. An arrow shows the sequence flow.



The element shown on the left is the standard ending point element. It shows the end of the process. An arrow shows the sequence flow.



The element shown on the left is a specified ending point element. It shows the end of the process if the process is cancelled. An arrow shows the sequence flow.



The element shown on the left is a modelling element used to further specify a certain task. The element is used to show that an IT-System is addressed by a certain task. Information flows are shown by a dotted line.

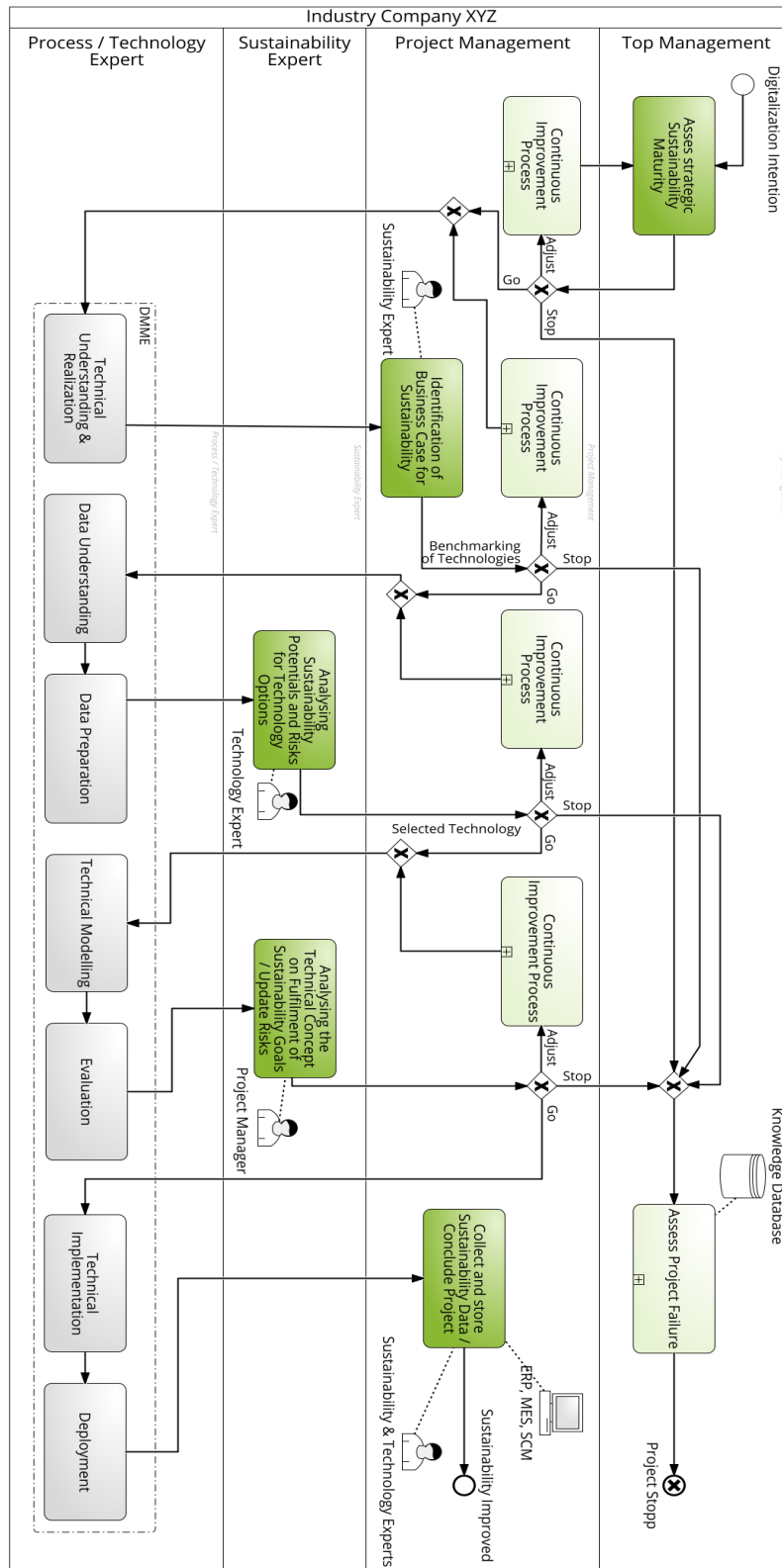


The element shown on the left is a modelling element used to further specify a certain task. The element is used to show that an additional participant is required for a certain task. Information flows are shown by a dotted line.



The element shown on the left is a modelling element used to further specify a certain task. The element is used to show that a data store is used for a task. Information flows are shown by a dotted line.

Abbildung 20: BPMN 2.0 Darstellung des SIA-DT Prozessmodells



Quelle: Eigenerstellung



---

## 4.5 Design Empfehlungen aus der Forschung

Wichtige Implikationen und Ergebnisse aus der Forschung, die in den vorangegangenen Kapiteln zitiert wurden, und in der Entwicklung und dem Design des SIA-DT Prozesses berücksichtigt sind, werden in Tabelle 10 konzentriert abgebildet. Das SIA-DT Prozessmodell, welches im Rahmen dieser Forschungsarbeit ausgearbeitet wird, stützt sich in seinem Aufbau auf diese Empfehlungen aus der Forschung. An einigen Stellen in dieser Arbeit, werden Angaben aus den Experten/Expertinnen-Interviews zitiert, welche die Design-Entscheidungen bezüglich des SIA-DT Prozesses unterstützen. Die einzelnen Design Empfehlungen werden, wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben, umgesetzt, indem der DMME Prozess (s. Kapitel 4.2.2) um die in Kapitel 4.4 beschriebenen Schritte ergänzt und in eine Form versetzt wird, bei der das Prozessmodell als Stage-Gate Modell genutzt werden kann. Es werden zehn Design Empfehlungen identifiziert und durch die im SIA-DT Prozessmodell exklusiven Prozessschritte, die in Kapitel 4.6 beschrieben sind, umgesetzt.

**Tabelle 10:** Design Empfehlungen aus der Forschung

(1)	<b>Integration of new sustainable processes and systems</b> rather than developing satellite systems	vgl. Elkington. 1998, S. 21; Figge et al. 2001, S. 4; Renda et al. 2022, S. 5; Sharma et al. 2022, S. 6
(2)	<b>Adjustment of existing systems and processes</b> towards social, ecological, and economical sustainability targeting	vgl. Renda et al. 2022, S. 5
(3)	Identification of a <b>“Business Case for Sustainability”</b> (economical sustainability)	vgl. Contini und Peruzzini. 2022, S. 1; Schaltegger und Wagner. 2012, S. 19
(4)	Adding <b>sustainability assessment</b> (especially social and environmental) into <b>business and technological processes</b>	vgl. DIN EN ISO 9001:2015, S. 20; Renda et al. 2022, S. 5; Sharma et al. 2022, S. 7; Whiteman et al. 2013, S. 307–308; Whiteman et al. 2013, S. 309
(5)	Assess current technology <b>best practices and potentials as well as risks</b> prior to sustainability initiatives	vgl. Faulkner und Badurdeen. 2014, S. 8; Sharma et al. 2022, S. 7
(6)	<b>Integration of sustainability strategy</b> and digitalization initiatives	vgl. Seyfried et al. 2023, S. 51
(7)	Deriving firm or <b>process specific KPIs</b> for business processes and operations <b>from strategic sustainability goals</b> on firm or macroeconomic level (e.g., SDGs, Planetary Boundaries)	vgl. Huaccho Huatuco und Ball. 2019, S. 361; Verma et al. 2022, S. 4; Whiteman et al. 2013, S. 307–308
(8)	<b>Deriving digitalization initiatives</b> from <b>sustainability assessment models</b> such as readiness / maturity models	vgl. Hein-Pensel et al. 2023, S. 200; Seyfried et al. 2023, S. 51
(9)	<b>Connecting top management and sustainability</b> initiatives <b>management</b> to achieve top level support	vgl. Börger. 2012, S. 315; Chiarini. 2019, S. 801–802
(10)	Develop a <b>data-driven management approach</b> for sustainability projects	vgl. Peças et al. 2023, S. 1

Quelle: Eigenerstellung

---

## 4.6 Exklusive SIA-DT Prozessschritte

Der SIA-DT erweitert die Arbeitsschritte des bekannten DMME Prozesses (s. Kapitel 4.2.2) um drei Arbeitsschritte und passt einen Arbeitsschritt des DMME Prozesses an. Die nachfolgend erklärten Schritte sind exklusiv im SIA-DT und machen, neben der Restrukturierung des Prozesses nach dem Stage-Gate Ansatz, den größten Anteil am Neuigkeitsgrad des SIA-DT Prozessmodells aus. Die nachfolgenden Unterkapitel beschreiben, warum die einzelnen Schritte ergänzt werden und welche Aktivitäten und Managementwerkzeuge sich für den Einsatz innerhalb der SIA-DT Schritte eignen. Bei der Erläuterung der ergänzten Schritte im SIA-DT Prozess wird auf die Design-Empfehlungen verwiesen, die bei der Analyse des Lösungsraums für die Forschungsfrage (s. Kapitel 2) erarbeitet wurden. Die Ausarbeitung der exklusiven SIA-DT Schritte stützen sich auf diese Empfehlungen.

### 4.6.1 Strategische Bewertung des Nachhaltigkeitsreifegrads und -potenzials

Der erste Schritt im SIA-DT Prozess ist die strategische Bewertung des Nachhaltigkeitsreifegrads und des -potenzials (vgl. Abbildung 20). Die Ergänzung von Managementprozessen und Workflowmodellen der Digitalisierung, wie dem DMME Prozess, sind wichtig, da in der Forschung gefordert wird, dass die Nachhaltigkeitsstrategie in Unternehmen stärker mit Digitalisierungsinitiativen verknüpft wird. Die Strategie soll besser in das Digitalisierungsmanagement integriert werden (vgl. Tabelle 10, Zeile 6). Die Analyse des Lösungsraums zur Forschungsfrage zeigt, dass die Forschung Nachhaltigkeitsreifegradmodelle empfiehlt, um ausgehend von strategischen Zielen, Digitalisierungsinitiativen abzuleiten (vgl. Tabelle 10, Zeile 8). Durch die Nutzung von Reifegradmodellen bei Digitalisierungsprojekten kann erzielt werden, dass die Projekte stärker auf die Erreichung oder Verbesserung von Nachhaltigkeitsgrößen ausgerichtet werden. Die Anpassung und Ausrichtung bestehender Prozesse und Systeme auf ökologische, soziale und ökonomische Ziele, ist ebenfalls eine Empfehlung aus der Forschung die maßgebend für die Einführung des ersten SIA-DT Schrittes ist (vgl. Tabelle 10, Zeile 2). Die Einführung einer strategischen Nachhaltigkeitsreifegradbewertung im SIA-DT Prozess führt zur Verknüpfung von Digitalisierungsmanagement und Top Management (deutsch: oberste Leitung). Diese Verknüpfung wird ebenfalls von der Literatur gefordert (vgl. Tabelle 10, Zeile 9). Außerdem können operative KPIs aus strategischen Nachhaltigkeitszielen abgeleitet werden (vgl. Tabelle 10, Zeile 7). Auch dies wird von der Forschung gefordert.

Ziel des ersten SIA-DT Schrittes ist es, eine strategische Bewertung von Potenzialen zur Steigerung der Nachhaltigkeit in der Wertschöpfungskette durch Digitalisierung zu erreichen. Reifegradmodelle sind vielfältig und je nach Unternehmen kann eine angepasste Vorgehensweise innerhalb dieses Schrittes sinnvoll sein. Reifegradmodelle, die in Unternehmen genutzt werden, sind bspw. Scorecards oder Warnsysteme (vgl. Anhang 9, I11). Der Begriff der Reifegradmodelle im Titel dieses Arbeitsschrittes ist bewusst gewählt, um alle Managementwerkzeuge zusammenzufassen, die für die strategische Bewertung von Nachhaltigkeitspotenzialen in Frage kommen.

Exemplarisch wird nun ein konkretes Modell genutzt, um die Anwendung des Schrittes zu demonstrieren. Das Kapitel 2.5.1 beschreibt das Reifegradmodell von Seyfried et al. im Detail. Das Modell wird genutzt, um Digitalisierungsmaßnahmen in der Produktion zur Steigerung des Nachhaltigkeitsreifegrades zu identifizieren und eignet sich daher besonders gut für den Einsatz im ersten SIA-DT Schritt. Um das Modell im SIA-DT Prozess anzuwenden, werden zunächst die Kerndimensionen der Nachhaltigkeits- und

---

Digitalisierungsstrategie identifiziert. Diese Dimensionen können, wie bei Seyfried et al. vorgeschlagen bspw. Ressourceneffizienz oder die Nutzung erneuerbarer Energien sein (vgl. Abbildung 9). Diese strategischen Ziele können auch andere strategische Nachhaltigkeitsziele sein (s. Kapitel 2.4.1). Die Ziele werden mittels Treiberbäumen genauer untersucht. Eine genaue Aufschlüsselung durch Treiberbäume ermöglicht die Aufspaltung des strategischen Ziels in granulare Messgrößen. Kriterien bilden eine erste Unterteilung des strategischen Ziels. Diese Kriterien werden wiederum in granulare Spezifikationen unterteilt. Die Aufschlüsselung wird durchgeführt, um strategische Ziele bzw. Dimensionen in operative Spezifikationen, wie dem produzierten Abfall in einem bestimmten Produktionsbereich, zu überführen.

Die Spezifikation ist ein operatives Ziel. Den Spezifikationen wird ein Reifegrad zugeordnet an dem abgelesen werden kann, welche Spezifikationen bzw. welche Produktionsbereiche verbessert werden müssen. Ausgehend von dieser strategischen Analyse, kann das Top Management bestimmen, in welche Bereiche der Produktion Ressourcen wie finanzielle Mittel geleitet werden, um Digitalisierungsprojekte gezielt umzusetzen. Die Ergebnisse der Analyse werden innerhalb des ersten Gates im Projektteam besprochen. Es wird eine Entscheidung getroffen, ob die Ergebnisse ausreichen, um einen strategisch wichtigen Bereich in der Produktion zu identifizieren, ob kein strategisch wichtiger Bereich identifiziert werden kann oder ob die Analyse bzw. das Modell angepasst werden muss. Im Modell von Seyfried et al. kann hierzu der Detaillierungsgrad des Treiberbaumes (Ebenen, Anzahl Spezifikationen, etc.) angepasst werden.

#### **4.6.2 Business-Case für Nachhaltigkeit**

Dieses Kapitel beschreibt den dritten SIA-DT Schritt. In der Literatur wird gefordert dass Nachhaltigkeit in technische und wirtschaftliche Aufgaben integriert wird, anstatt neue alleinstehende Prozesse und Systeme zu entwickeln (vgl. Tabelle 10, Zeile 1). Eine Aufgabe, die im Rahmen des Digitalisierungsmanagements regelmäßig durchgeführt wird, ist das Aufstellen eines Business Case. Die Identifikation eines wirtschaftlich rentablen Anwendungsfalls für die Implementierung digitaler Technologien zur Steigerung von Nachhaltigkeitszielen wird in diesem Schritt durchgeführt. Die Forschung empfiehlt die Anpassung von bestehenden Prozessen um einen Nachhaltigkeitszielbezug (vgl. Tabelle 10, Zeile 2). Auch dies wird mit diesem Schritt berücksichtigt. Im dritten SIA-DT Schritt sollen operative Nachhaltigkeitsziele von den Unternehmen in den Business-Case aufgenommen werden. Die Identifikation eines Business Case für Nachhaltigkeit wird in der Forschung als essenziell für Initiativen zur Steigerung der Nachhaltigkeit beschrieben und aus diesem Grund in das SIA-DT Prozessmodell integriert (vgl. Tabelle 10, Zeile 3). Ohne eine ökonomische Nachhaltigkeit, können die ökologische und soziale Dimension nicht verbessert werden, da Unternehmen durch wirtschaftliche Nachhaltigkeit ihre Existenz sichern.

Der Schritt des Business-Case für Nachhaltigkeit ist der angepasste Business Understanding Schritt des DMME Prozesses. Im DMME Prozess werden in diesem Schritt die Ziele und Anforderungen des Projekts in eine Problemstellung überführt, welche durch die zu implementierende Technologie gelöst wird (s. Kapitel 4.2.2). Anders als im DMME Prozess, geht es im dritten SIA-DT Schritt nicht um die Definition der Problemstellung. Diese wird im ersten SIA-DT Schritt ausgehend von der strategischen Analyse erstellt. Der Vergleich verschiedener Technologieoptionen auf Wirtschaftlichkeit und die Verknüpfung von sozialen und ökologischen Zielen mit ökonomischen Zielen steht im Fokus.

Der dritte Schritt des SIA-DT Prozesses wird nach den Schritten des Technischen Verständnisses und der Technischen Realisierung durchgeführt. Diese Schritte schaffen die Informationsgrundlage für erste genauere Betrachtungen und Vergleiche. Insbesondere das technische Verständnis des Bereichs der im ersten SIA-DT Schritt als strategisch wichtig identifiziert wurde, ist bedeutend. Durch ein technisches Verständnis des Produktionsbereichs (z. B. der Infrastruktur, Anlagen, IT-Systemen, Sensorik, etc.) können verschiedene digitale Technologien, die sich zur Steigerung des Reifegrads der ausgewählten operativen Nachhaltigkeitsziele eignen, verglichen werden. Neben der Erreichung der strategischen Ziele durch Erhöhung des Nachhaltigkeitsreifegrads in bestimmten Produktionsbereichen werden die Technologieoptionen in diesem Schritt auf ökonomische Nachhaltigkeit untersucht.

Analog zum DMME gibt das SIA-DT Prozessmodell, als Modell auf der Meta-Ebene, keine Methoden oder Werkzeuge vor, die angewendet werden müssen. Unternehmen, die den SIA-DT Prozess umsetzen, sollen bestehende Werkzeuge nutzen und wie von der Forschung empfohlen, um Nachhaltigkeitsziele erweitern. Bisher gibt es wenige Veröffentlichungen die konkrete Managementwerkzeuge für die Erstellung des Business Case für Nachhaltigkeit beschreiben. Die wichtigsten Faktoren des Business Case für Nachhaltigkeit sind bekannt. Die Reduktion von Kosten, die Reduktion von Risiken oder die Erwirtschaftung von Gewinn und die Erhöhung der innovativen Fähigkeit sind die wichtigsten Faktoren. Die direkte Verlinkung von Nachhaltigkeitszielen und Kosten ist an vielen Stellen möglich. Die Reduktion von Materialkosten kann bspw. an das Ziel der Reduktion von Abfällen in der Produktion geknüpft sein (vgl. Schaltegger und Lüdeke-Freund. 2012, S. 7). Gelingt die direkte Verknüpfung von operativen Nachhaltigkeitszielen (s. Kapitel 2.4.2) mit Wirtschaftlichkeitszielen (vgl. Tabelle 11), so können klassische Methoden der Wirtschaftlichkeitsberechnung durchgeführt werden. Die wichtigsten Methoden zur wirtschaftlichen Bewertung von Projekten lassen sich in fünf Kategorien zusammenfassen: Kapitalwertmethoden, Zinsfußmethoden, Verhältnis-Kennzahlen, Berechnung der Rückzahlung bzw. des Gewinns und die Projekt-Buchhaltung (vgl. Remer und Nieto. 1995, S. 81). Die Projekt-Buchhaltung ist in diesem Schritt nicht aufschlussreich, da der Schritt frühzeitig im SIA-DT Prozessablauf erfolgt. Einige Methoden, die in diesem Schritt genutzt werden können, sind in Tabelle 11 dargestellt. Hierbei ist auf die Verknüpfung der Nachhaltigkeitsziele mit den Kostenzielen zu achten. Kostenziele müssen sich in Nachhaltigkeitsziele zurückführen lassen, falls ökonomische Schwellwerte definiert werden, die für den weiteren Projektablauf entscheidend sind.

**Tabelle 11:** Übersicht über mögliche Methoden der ökonomischen Projektbewertung

Net present value methods	Ratio methods	Rate of return methods	Payback methods
Net present value	Return on original investment	Internal rate of return	Conventional payback period
Life cycle costing	Return on average investment	External rate of return	Discounted payback period
Maximum prospective value	Profit-to-investment	Growth rate of return	Project balance
	Cost effectiveness		

Eigenerstellung in Anlehnung an Remer und Nieto. 1995, S. 81

---

Die Erstellung der ökonomischen Bewertung der Technologieoptionen nutzt Erfahrungswerte, das Expertenwissen der Prozessbeteiligten und Herstellerangaben bzw. Datenblätter zu den Technologieoptionen sowie die Ergebnisse des Schritts des Technischen Verständnis. Die Ergebnisse dieses SIA-DT Schritts werden in das zweite Gate des Prozesses überführt. Das zweite Gate bestimmt, ausgehend von den Ergebnissen, ob wirtschaftlich attraktive Einsatzmöglichkeiten für verschiedene Technologieoptionen bestehen und ob das Projekt aus ökonomischer Perspektive machbar ist.

#### **4.6.3 Nachhaltigkeits- und Risikoanalyse von Technologieoptionen**

Der sechste Schritt des SIA-DT Prozessmodells wird eingeführt, um der Forderung der Forschung bezüglich der Anpassung und Ausrichtung bestehender Systeme und Prozesse auf Nachhaltigkeitsziele nachzukommen (vgl. Tabelle 10, Zeile 2). Der Prozess der Bewertung möglicher Technologieoptionen zur Lösung der definierten Problemstellung darf nicht rein technisch sein, sondern muss um Nachhaltigkeitsziele aus den drei Bereichen ökologisch, sozial und ökonomisch ergänzt werden. In Unternehmen werden i. d. R. bei Digitalisierungsprojekten in frühen Projektphasen ökonomische Vergleiche der Technologieoptionen durchgeführt. Der ökonomische Vergleich von Technologieoptionen wird im SIA-DT Prozessmodell in Schritt Drei (s. Kapitel 4.6.2) durchgeführt. Im sechsten Schritt des SIA-DT Prozessmodells werden die ausgewählten wirtschaftlich attraktiven Technologieoptionen, eine Vorauswahl von Technologien, auf Nachhaltigkeitsverbesserungspotenziale in der ökologischen und sozialen Dimension überprüft. Die Durchführung dieses Vergleichs wird zur Erfüllung der Forderung nach Integration von Nachhaltigkeitsbewertungen, in bestehende Geschäftsprozesse, genutzt (vgl. Tabelle 10, Zeile 4). Der sechste SIA-DT Schritt erfüllt ebenfalls die Forderung der Forschung, Potentiale und Risiken von Technologien bezogen auf die Nachhaltigkeitsziele, vor der eigentlichen Implementierung der Technologien, zu vergleichen (vgl. Tabelle 10, Zeile 5). Erreicht wird, dass auf Nachhaltigkeitsrisiken durch die Implementierung einer Technologie, frühzeitig reagiert wird. Gleichzeitig werden noch nicht identifizierte Potentiale bei der technischen Konzeptionierung berücksichtigt.

Der Schritt der Analyse der Nachhaltigkeitspotentiale und -risiken der Technologieoptionen folgt dem Schritt des Datenverständnisses und der Datenaufbereitung. Im Schritt der Datenvorbereitung ist, anders als im DMME Prozess, nicht die Vorbereitung der Daten für eine bestimmte Technologie entscheidend. Dies wird im SIA-DT Prozessmodell im Modellierungsschritt durchgeführt. Die Schritte des Datenverständnisses und der Datenvorbereitung dienen im SIA-DT Prozessmodell dazu, den in diesem Kapitel beschriebenen Arbeitsschritt vorzubereiten. Die Informationen aus den Daten müssen verstanden werden, um die Risiken und Potentiale der Technologien abzuleiten und zu gewichten. Sind die Daten nicht schlüssig, oder für bestimmte Teilnehmende (z. B. den Nachhaltigkeitsexperten/-expertinnen) nicht verständlich, werden die Daten adressatengerecht vorbereitet (bspw. als Dashboards). Außerdem wird im Schritt der Datenvorbereitung überprüft, für welche Technologie die Daten aus technischer Sicht geeignet sind, um die in der zu Beginn definierten Problemstellung angegebenen Nachhaltigkeitsziele zu erreichen.

Für die Analyse von Technologieoptionen stehen verschiedene Managementwerkzeuge zur Verfügung. Die in dieser Arbeit durchgeführten Interviews zeigen, dass die Verfügbarkeit und Menge der Daten in frühen Projektphasen noch nicht ausreicht um komplexe und datenaufwendige Methoden wie die LCA anzuwenden (vgl. Anhang 9, I12, I13).

---

Je nach Datenverfügbarkeit, werden in diesem Schritt (unternehmensspezifische) Methoden angewendet, die einen Vergleich der Potenziale und Risiken von Technologien ermöglichen. Eine Möglichkeit ist die Durchführung einer E-VSM oder einer VSM 4.0, um zu ermitteln welche Auswirkung die Einführung einer Technologie auf die Leistung der Produktionsprozesse besitzt (s. Kapitel 4.1.2). Auch die Durchführung eines Sustainability Assessment of Technologies (SAT, deutsch: Nachhaltigkeitsbewertung von Technologien) ist sinnvoll.

Das SAT kann auf strategischer und operativer Ebene angewendet werden. Auf der operativen Ebene wird die Methode u. a. für den Vergleich von Nachhaltigkeitspotentialen alternativer (Shop Floor) Technologieoptionen angewendet (vgl. United Nations Environment Programme. 2012, S. 5–6). Die SAT wird in drei Schritten durchgeführt. Zunächst werden die Technologieoptionen, die für die Lösung der aus der Strategie abgeleiteten Problemstellung eingesetzt werden können, qualitativ bewertet. Zumeist mit einem Ja/Nein Bewertungs- und Ausschlusschema. Technologien, die sich besser eignen, werden im zweiten Schritt quantitativ verglichen. Im letzten Schritt folgt eine detaillierte Gegenüberstellung und Bewertung und auf Basis dieser wird eine Entscheidung für oder gegen Technologien getroffen (vgl. United Nations Environment Programme. 2012, S. 13). Im Leitfaden zur Anwendung der SAT des United Nations Environment Programme wird ein Anwendungsfall des SAT auf operativer Ebene zur Auswahl und zum Vergleich von Technologieoptionen beschrieben. Dieser kann als Orientierung genutzt werden, mit der Unternehmen eigene Auswahlkriterien für die zu lösende Fragestellung definieren können (vgl. United Nations Environment Programme. 2012, S. 27).

Die SAT ist nur eine von vielen Methoden, die in diesem Arbeitsschritt angewendet werden können. Unternehmen können auch eigene Methoden verwenden, solange diese dem Ziel des sechsten Arbeitsschritts des SIA-DT Prozessmodells genügen. Ziel des sechsten Schritts ist es, die entsprechenden Informationen für das Management bereitzustellen, mit denen im dritten Gate des SIA-DT Prozessmodells die Entscheidung getroffen werden kann, welche Technologie ökologisch, sozial und ökonomisch die beste Lösung der Problemstellung bietet. Diese Technologie wird dann in nachfolgenden Schritten technisch konzeptioniert und pilotiert. Für die nachhaltigkeitszielorientierte technische Entwicklung der Lösung eignet sich der Einsatz der in Kapitel 2.5.3 vorgestellten SQFD.

#### **4.6.4 Detaillierte Nachhaltigkeits- und Risikobewertung des technischen Konzepts**

Dieses Kapitel beschreibt den neunten Schritt des SIA-DT Prozessmodells. Risiken und Potenziale des sechsten SIA-DT Schritts werden für die ausgewählte Technologie im neunten SIA-DT Schritt erneut aufgegriffen und überprüft, ob diese durch das technische Konzept erreicht werden und welche Risiken neu bewertet werden müssen. Ziel des neunten SIA-DT Schritts ist es, durch eine erneute Nachhaltigkeits- und Risikobewertung des technischen Konzepts vor der finalen Implementierung der Technologie in der Produktivumgebung, auf Risiken zu reagieren, die sich aus dem technischen Konzept sowie den Tests der Technologie ergeben. Weitere und noch nicht realisierte Potenziale für ökologische, soziale und ökonomische Verbesserungen, die durch die Einführung des technischen Konzepts in der Produktivumgebung erreicht werden können, werden identifiziert.

Die Bewertung des technischen Konzepts beinhaltet die zuvor festgelegten Nachhaltigkeitsziele. Dies erfüllt die Forderung der Forschung, eine stärkere Ausrichtung von Geschäftsprozessen an

---

Nachhaltigkeitszielen zu erreichen (vgl. Tabelle 10, Zeile 2). Auch die Forderung aus der Forschung einer besseren Integration von Nachhaltigkeitsbewertungen in bestehende Geschäftsprozesse wird erfüllt (vgl. Tabelle 10, Zeile 4). Der neunte Schritt des SIA-DT Prozessmodells dient insbesondere dazu, die Forderung der Forschung zur Bewertung von Potentialen und Risiken einer Technologie zu erzielen. Die Potenziale und Risiken werden dabei vor der eigentlichen Implementierung der Technologien in der Produktivumgebung bewertet (vgl. Tabelle 10, Zeile 5).

Anders als der in Kapitel 4.6.3 erläuterte sechste Schritt des SIA-DT Prozessmodells, betrachtet der neunte Schritt das fertiggestellte technische Konzept der in Gate 4 ausgewählten Technologie. Der neunte SIA-DT Schritt setzt voraus, dass die beiden vorangegangenen Schritte der technischen Modellierung und der (technischen) Bewertung (vgl. Abbildung 20) erfolgreich durchlaufen wurden und eine umfangreiche und detaillierte Datengrundlage aus dem Test-Betrieb des technischen Konzepts vorliegt. Der Schritt der Bewertung (Evaluation) bezieht sich im SIA-DT Prozessmodell auf die technische, aber nicht nachhaltigkeitsbezogene Bewertung durch die technischen Experten/Expertinnen. Erst der in diesem Kapitel beschriebene neunte Schritt des SIA-DT Prozessmodells integriert die Ergebnisse der technischen Bewertung mit einer Nachhaltigkeitsbewertung.

In Kapitel 2.5 dieser Arbeit werden Modelle der Nachhaltigkeitsbewertung und -quantifizierung vorgestellt. Nachhaltigkeitsreifegradmodelle eignen sich für den strategischen Einsatz im ersten SIA-DT Schritt. Die SQFD eignet sich für den Einsatz in der frühen Entwicklungsphase des technischen Konzepts. Die LCA, wie von Zschieschang vorgeschlagen (vgl. Zschieschang. 2013, S. 120), eignet sich für die Nachhaltigkeitsbewertung des technischen Konzepts im neunten Schritt des SIA-DT Prozessmodells. Die LCA hat viele Vorteile. Sie wird genutzt, um zu überprüfen, ob ökologische Grenzwerte eingehalten werden bzw. definierte Zielwerte unter- oder überschritten werden. Mit der LCA können Nachhaltigkeitspotentiale aufgedeckt werden, die mittels LCE systematisch in technische Lösungen umgesetzt werden. Die LCA ist nach internationalen Normen standardisiert. Durch zahlreiche Softwareanwendungen lässt sich die LCA automatisiert mit digitalen Daten durchführen (s. Kapitel 2.5.2). Die LCA besitzt einen starken Fokus auf ökologischen Nachhaltigkeitszielen. Die SLCA (Social Life Cycle Assessment) erweitert die LCA-Methode um eine soziale Perspektive. Die SLCA lässt sich mit der LCA für eine holistische Betrachtung von ökologischen und sozialen Nachhaltigkeitszielen kombinieren (vgl. Lehmann et al. 2013, S. 1581). Neben der LCA können Unternehmen auch unternehmensspezifische Methoden für die Nachhaltigkeitsbewertung des technischen Konzepts nutzen, wenn diese im Unternehmen vorhanden sind. Die Risikobewertung von technischen und nachhaltigkeitszielbezogenen Risiken des technischen Konzepts kann mittels bewährter Methoden erfolgen.

Der Schlußschluss von Qualitätsmanagement und Nachhaltigkeitsmanagement wurde an vielen Stellen der Arbeit aufgezeigt. Die Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) ist eine weit verbreitete Managementmethode und wird zur Minimierung von Fehlerursachen und Risiken genutzt. Wird eine FMEA in der Entwicklung angewendet, wird diese als sogenannte DFMEA (Design Failure Mode and Effects Analysis) bezeichnet (vgl. Li und Wu. 2018, S. 1). Die FMEA stammt ursprünglich aus dem Qualitätsmanagement, wird von Unternehmen aber immer häufiger um ökologische und soziale Aspekte ergänzt. Die Anwendung der FMEA hilft Unternehmen Fehlerursachen frühzeitig zu erkennen und zu beseitigen (vgl. Ahsen et al. 2022, S. 1). Die DFMEA kann aber auch am Ende des Entwicklungsprozesses genutzt werden, um Risiken für die Nutzung, bzw. in diesem Fall der Implementierung, zu analysieren. Auch Nachhaltigkeitsrisiken



---

können untersucht werden. Die RPZ (Risikoprioritätszahlen), die im Kern der FMEA stehen, werden durch Multiplikation dreier Kennwerte, die jeweils eine Gewichtung von eins bis zehn erhalten, gebildet. Multipliziert wird der Kennwert der Wahrscheinlichkeit des Auftretens des Fehlers, der Kennwert der Wahrscheinlichkeit des Entdeckens des Fehlers und der Kennwert des Schadens der beim Fehlereintritt entsteht (vgl. Ahsen et al. 2022, S. 2). RPZ lassen sich für technische Risiken und ebenso für Nachhaltigkeitsrisiken bestimmen. Unternehmen die Nachhaltigkeit in die FMEA integrieren sind erfolgreicher im Risikomanagement von Nachhaltigkeitsrisiken (vgl. Ahsen et al. 2022, S. 10). Wird im Unternehmen zu Beginn des Schritts der technischen Modellierung oder der (technischen) Bewertung eine DFMEA genutzt, kann diese im neunten Schritt um nachhaltigkeitsbezogene Risiken erweitert werden.

Der neunte Schritt des SIA-DT wird abgeschlossen, indem die konsolidierten Ergebnisse der technischen Bewertung, sowie der Nachhaltigkeits- und der Risikobewertung in das vierte Gate des SIA-DT Prozessmodells überführt werden. Diese Informationen werden genutzt, um zu entscheiden, ob das entwickelte technische Konzept in der Produktivumgebung implementiert wird, Nacharbeit bzw. Verbesserung benötigt wird oder das Projekt abgebrochen wird.

#### **4.6.5 Kontinuierliche Datenerfassung und Speicherung von Nachhaltigkeitsdaten**

Der letzte Schritt des SIA-DT Prozessmodells wird eingeführt, da in der Literatur die Entwicklung eines datengetriebenen Managements für Nachhaltigkeit und Nachhaltigkeitsprojekte gefordert wird (vgl. Tabelle 10, Zeile 10). Hierzu trägt der SIA-DT Prozess bei, indem er im letzten Schritt vorgibt, dass ein Konzept zur Datenerfassung und Speicherung der Daten der implementierten Technologie entwickelt werden muss. Der letzte SIA-DT Prozessschritt folgt auf die Nutzung der implementierten Technologie in der Produktivumgebung (vgl. Abbildung 20). Dabei steht die Anbindung der Daten an die bestehende Informationstechnik (IT) des Unternehmens im Mittelpunkt. Dieser Schritt des SIA-DT Prozesses wird ebenfalls genutzt, um Verbesserungspotenziale zu erfassen, die bei zukünftigen Prozessdurchläufen umgesetzt werden. Die kontinuierliche Erfassung und Einspeisung der Daten in die IT-Systeme der Industrieunternehmen hilft auch dabei, bei zukünftigen Prozessdurchläufen die Anforderungen an die Technologien zu definieren, den Business Case für Nachhaltigkeit zu identifizieren, eine bessere Nachhaltigkeitsbewertung und eine bessere Auswertung von Best Practices, Potentialen sowie Risiken der Technologien zu erfassen (vgl. Tabelle 10, Zeile 3, 4, 5). Experte/Expertin 3 bestätigt in den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Experten/Expertinnen-Interviews, dass bereits heute für Produktionsprozesse eine kontinuierliche Datenerfassung und -speicherung erfolgt. Diese Daten werden zur Überprüfung der Erreichung von Nachhaltigkeitszielen genutzt. Weitere Optimierungspotenziale lassen sich mit diesen Daten ebenfalls identifizieren. Die Daten werden jedoch nicht automatisiert verarbeitet und bisher auch nicht zur Nachhaltigkeitssteuerung genutzt (vgl. Anhang 10, I14).

Anders als die zuvor beschriebenen Arbeitsschritte des SIA-DT Prozessmodells, beschäftigt sich dieser Schritt nicht nur mit der technischen Umsetzung, sondern mit den Anforderungen an die Anbindung und Echtzeitversorgung der Administrative und der obersten Leitung mit den Nachhaltigkeitsdaten, die durch die implementierte Technologie erfasst und erzeugt werden. Experte/Expertin 2 besitzt eine hohe Expertise im Bereich des Umweltmanagements und wurde unter anderem befragt, was im letzten Schritt des SIA-DT Prozesses zu beachten ist.

---

Experte/Expertin 2 beschreibt, dass es in Unternehmen verschiedene Modelle und Vorlagen gibt. Für verschiedene Fragestellungen fallen diese Modelle unterschiedlich aus. Je nach Führungsebene und Verwendung der Daten bedarf es anderer Modelle. Dabei werden Aufgaben, wie die Erfüllung von internen und externen Berichtspflichten und die Information der internen Steuerung erfüllt. Hierfür gibt es Standards wie Scorecards aber auch unternehmensspezifische Informationssysteme. Die Rückführung von Daten an die höheren Führungsebenen erfolgt in möglichst übersichtlicher Form, so Experte/Expertin 2 (vgl. Anhang 9, U14). Heute gibt es in den Unternehmen, insbesondere in den großen Konzernen, für die Aufbereitung der betrieblichen Daten eigene Funktionsbereiche. Die Aufbereitung der Daten unterliegt dabei zahlreichen und strengen Richtlinien. Einige wichtige Standards sind die International Financial Reporting Standards (IFRS) des International Accounting Standard Board (IASB) und des International Sustainability Standards Board (ISSB). Diese beschäftigen sich auch mit der Offenlegung der Umweltdaten des Unternehmens. Die Relevanz und Materialität der Daten, die Vergleichbarkeit, die Vollständigkeit, die Verifizierbarkeit, die Verständlichkeit, die Verlässlichkeit und die Aktualität der Daten sind besonders wichtig. Für nicht finanzielle Berichte sind insbesondere die Zukunftsorientierung, der strategische Fokus, die Verknüpfung zu älteren Daten und Berichten, die Genauigkeit, die Neutralität und die adressatengerechte Gestaltung und Aufbereitung der Daten wichtig (vgl. ACCA. 2018, S. 3–5).

Der letzte Schritt des SIA-DT Prozesses, dient dazu ein Datenmanagement für die implementierte Technologie einzurichten, bei dem die Daten automatisiert in die betrieblichen Datensilos und -systeme überführt und oben genannte Punkte eingehalten werden. Dabei sollen nicht nur Daten, die ökonomische Bewertungen erlauben, gespeichert werden, sondern in Abstimmung mit den Experten/Expertinnen des Unternehmens aus dem Umweltmanagement gezielt Daten erhoben und dann entsprechend der Standards weiterverarbeitet werden. Diese Aufbereitung der Daten ist nicht Teil des letzten SIA-DT Schrittes.

Auch Experte/Expertin 2 weist darauf hin, dass die Anbindung des SIA-DT Prozesses an die Funktionsbereiche, welche sich mit der Aufbereitung der Daten befassen, eigenständige Prozesse sind. Die Prozesse der Datenaufbereitung und Weiterverarbeitung erfordern andere Prozessbeteiligte als diejenigen Rollen die im SIA-DT Prozess gebraucht werden (vgl. Anhang 9, U9). Die Konzeptionierung der automatisierten Erfassung und Speicherung der Daten sind jedoch Inhalte des letzten SIA-DT Prozessschritts. Immer mehr Start-ups werden gegründet, die sich mit der Automatisierung und der Aufbereitung von Nachhaltigkeitsdaten befassen. Viele dieser Start-ups führen Lösungen ein, mit denen die Daten automatisiert in die unternehmensspezifischen Modelle überführt werden können. Auch bestehende Anbieter, wie das Unternehmen SAP (Systemanalyse und Programmentwicklung), das ERP-Systeme und andere angrenzende Softwarelösungen wie MES-Systeme (etc.) anbietet, entwickelt Software für die automatisierte Aufbereitung von Nachhaltigkeitsdaten. Die Verwendung der Daten über die Unternehmensgrenzen hinaus, bspw. Daten aus dem Wertschöpfungsnetzwerk, soll künftig ebenfalls möglich sein (vgl. Anhang 9, U14).

Der letzte SIA-DT Prozessschritt (vgl. Abbildung 18, Abbildung 20) wird vom Projektmanagement in Zusammenarbeit mit den technischen Fachkräften und dem Umweltmanagement durchgeführt. Aufgaben in diesem Schritt sind unter anderem die Festlegung der Dokumentationsmethoden, der Speicherorte, der Speicher- und ggf. Prüfungsintervalle und das Format sowie die Struktur der gespeicherten Daten. Ebenfalls sollte in diesem Schritt bereits einbezogen werden, wie die Daten aktuell oder zukünftig für das Berichtswesen und die interne Steuerung aufbereitet werden. In Anbetracht der aktuellen Entwicklungen ist darauf zu achten, dass eine automatisierbare Weiterverarbeitung ermöglicht wird. Der letzte SIA-DT

---

Schritt dient auch dazu, eine abschließende Projektbewertung sowie die Erfassung der sogenannten Lessons Learned durchzuführen. Verbesserungspotenziale für zukünftige Prozessdurchläufe werden dokumentiert und in kommenden Prozessdurchläufen umgesetzt.

Die Umsetzung der Potenziale wird an den jeweiligen Gates (vgl. Abbildung 18) des nächsten Prozessdurchlaufs geprüft. Die Lessons Learned, die während des Projektabschlusses erfasst werden oder zum Projektabschluss final konsolidiert und dokumentiert werden, sind für ein langfristig erfolgreiches Projektmanagement entscheidend (vgl. Aziz. 2015). Der Prozess des Projektabschlusses ist in vielen Unternehmen standardisiert. Der letzte SIA-DT Prozessschritt gibt hierfür keine Vorgaben. Wichtig sind jedoch, dass Elemente wie der Projektabschlussbericht, Nachkalkulationen und eine Erfahrungssicherung durchgeführt werden (vgl. Albrecht et al. 2016, S. 352).

Anders als beim irregulären Projektabschluss, der durchgeführt wird, wenn das Projekt abgebrochen wird, steht beim regulären Projektabschluss, im letzten SIA-DT Schritt, auch die Erfassung von Potentialen und Verbesserungsmöglichkeiten für die Implementierung der Technologie in die operative Umgebung im Fokus. Das Wissen kann für zukünftige Projekte genutzt werden. Aufbauend auf diesem Wissen können neue Entscheidungskriterien für das Gate 4 festgelegt werden.

---

## 5 Evaluation des SIA-DT

---

Das in Kapitel 4 dieser Arbeit entwickelte SIA-DT Prozessmodell, kann in Unternehmen genutzt werden, um eine systematische Vorgehensweise unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitszielen bei der Implementierung digitaler Technologien zu erreichen. Das SIA-DT Prozessmodell erweitert dazu den bekannten DMME Prozess um mehrere Schritte, welche Nachhaltigkeitsbetrachtungen in den drei Dimensionen der ökologischen, sozialen und der ökonomischen Nachhaltigkeit, in den Prozess mit aufnehmen. Im Rahmen des in der Arbeit genutzten DSR-Forschungsansatzes (s. Kapitel 2.7.1; Abbildung 13) wurde die Entwicklung des Prozessmodells auf Basis von wissenschaftlichen Artikeln und der einschlägigen Literatur aus der Praxis gestützt. Hierzu wurde zunächst die Forschungslücke identifiziert. Bisher gibt es in der Forschung keine Prozessmodelle für eine systematische Vorgehensweise zur nachhaltigkeitszielgetriebenen Technologieimplementierung. Zur Lösung dieses Problems wurde der SIA-DT Prozess entwickelt (s. Kapitel 2.7.1). Das entwickelte Modell wird nun mittels Experten/Expertinnen-Interviews evaluiert. Die Evaluation dient zur Überprüfung des Nutzens und des Potenzials, welches das SIA-DT Prozessmodell für die Unternehmenspraxis besitzt. Nachfolgend steht die kritische Diskussion der Ergebnisse im Mittelpunkt. Limitationen, Potenziale und Anregungen für zukünftige auf dem SIA-DT Prozess aufbauende Forschungsmöglichkeiten werden herausgestellt.

### 5.1 Interviewplanung

Die Experten/Expertinnen-Interviews wurden im August 2023 durchgeführt. Die Tabelle 12 zeigt die Rolle der Interview-Teilnehmenden, sowie die Datierung und Art der Interviews. Ein Interview erfolgte vor Ort in einem persönlichen Gespräch. Drei von vier Interviews wurden Online auf der Microsoft Teams Plattform durchgeführt. Die Interviews wurden aufgezeichnet und anschließend transkribiert. Die Antworten der Experten/Expertinnen wurden danach den zugehörigen Fragen des Fragenkatalogs zugeordnet (vgl. Anhang 7; Anhang 8; Anhang 9; Anhang 10; Anhang 11). Die fertige Zusammenschrift der Antworten wurde den Interview-Teilnehmenden erneut zugeschickt, um die richtige Zusammenfassung sowie die richtige Zuordnung der Antworten zu den einzelnen Fragen der Interviewleitfäden von den Experten/Expertinnen bestätigen zu lassen. Außerdem wurden die Interview-Teilnehmenden zu ihren Präferenzen bezüglich der Anonymisierung oder Pseudonymisierung der Antworten im Falle einer Veröffentlichung dieser Arbeit befragt.

Die Auswahl der Experten/Expertinnen erfolgte auf Basis der langjährigen Expertise der interviewten Personen im Bereich des Nachhaltigkeitsmanagements oder der Digitalisierung. Experte/Expertin 1 und 3 arbeiten in der Industrie und Experte/Expertin 2 und 4 in der Forschung und Lehre an technischen Universitäten. Experte/Expertin 1 wurde ausgewählt, da Experte/Expertin 1 in der Rolle als Head of Digital Transformation & Operational Technology tätig ist. Experte/Expertin 1 besitzt eine hohe Expertise im Bereich der Digitalisierung in Industrieunternehmen und ist in der Lebensmittelindustrie tätig. Auch Experte/Expertin 3 beschäftigt sich mit der Digitalisierung in der Produktion. Experte/Expertin 3 ist als Manager of Engineering für die Smart Factory Initiative bei einem Metallkonzern tätig. Experte/Expertin 2 hält eine Professur für nachhaltige Unternehmensführung an einer technischen Universität und wurde daher insbesondere zur Systematisierung von Nachhaltigkeitserreichung in Unternehmen und zu

Umweltmanagementsystemen befragt. Experte/Expertin 4 ist für die Abteilungsleitung der Abteilung für Maschinendatenverwertung an einer technischen Universität zuständig. Experte/Expertin 4 wurde hauptsächlich zu den Themen der Vorgehensmodelle zur Implementierung digitaler Technologien befragt. Dabei wurden insbesondere zum DMME Prozess, der die Grundlage des SIA-DT Prozessmodells bildet, Fragen gestellt.

**Tabelle 12:** Interviewplanung der Experten/Expertinnen-Interviews

Name of Expert	Role / Function	Organization	Date Time (24h)	Interview-Type
Expert 1	Head of Digital Transformation & OT	[Anonym]	08.08.2023 9:30	In Person
Expert 2	Chair of Sustainable Management	[Anonym]	10.08.2023 15:00	Online
Expert 3	Manager of Engineering Smart Factory Initiative	[Anonym]	11.08.2023 9:00	Online
Expert 4	Head of Department Machine Data Utilization	[Anonym]	14.08.2023 16:00	Online

Quelle: Eigenerstellung mit Angaben aus Anhang 8 bis Anhang 11 jeweils A1-3

## 5.2 Interviewablauf

Zu Beginn der Interviews wurde den Teilnehmenden in einer Einleitung (ca. 10min) die Motivation für das Thema, sowie die Fragestellung vorgestellt, welche diese Forschungsarbeit, im Rahmen derer die Interviews stattfanden, bearbeitet. Die Bedeutung des Themas Nachhaltigkeit für die Industrie und Gesellschaft, sowie die Rolle der digitalen Technologien zur Erreichung von Nachhaltigkeitszielen wurde kurz erklärt. Danach wurde die DSR-Methodologie, der diese Arbeit folgt, den Teilnehmenden anhand von Abbildung 13 erläutert und die Bedeutung der Experten/Expertinnen-Interviews für die Evaluation des entwickelten SIA-DT Prozessmodells herausgestellt. Den Interview-Teilnehmenden wurden einige exemplarische Anwendungsfälle genannt, in denen digitale Technologien, die ökologische, die soziale und die ökonomische Nachhaltigkeit im Unternehmen bzw. der Produktion verbessern können. Vor dem Beginn des eigentlichen Interviews wurde den Experten/Expertinnen der SIA-DT Prozess, sowie Schritte, die in den jeweiligen Phasen durchzuführen sind, mithilfe der Abbildung 18 vorgestellt.

Während des Gesprächs mit den Interview-Teilnehmenden wurden den jeweiligen Experten/Expertinnen ausgewählte Fragen aus dem zuvor für die jeweilige Person erstelltem individuellem Interviewleitfaden gestellt. Die Interview-Teilnehmenden wurden jeweils ca. 45-60 Minuten interviewt. Die einzelnen Leitfäden sind dieser Arbeit als Anhänge beigefügt. Die individuelle Auswahl der Fragen für die einzelnen Leitfäden wurde der Interview-Vorlage (vgl. Anhang 7) entnommen. Es wurden während der

---

Interviewdurchführung keine inhaltlich vom Interviewleitfaden abweichenden Fragen gestellt. Zu einigen Antworten der Experten/Expertinnen wurden vereinzelt Rückfragen gestellt. Die Themengebiete und einige wichtige Fragen dieser Themengebiete werden nun vorgestellt.

Die Fragen, die in der Interview-Vorlage aufgeführt werden, sind nach Themengebieten gruppiert. Alle Themengebiete wurden mit einem Kürzel versehen, um die schnelle Identifikation einzelner Fragen zu ermöglichen. Die Kürzel der Themengebiete finden sich in eckigen Klammern neben den Oberbegriffen der Themengebiete (vgl. Anhang 7). Die Nummern der Antworten und Fragen sind jeweils nach dem Buchstabe A für Antwort oder dem Buchstaben F für Frage zu sehen. In der Arbeit werden die Antworten der Interview-Teilnehmenden zitiert, indem das jeweilige Interview mit dem Kürzel des Themenbereichs der zitierten Antwort sowie der Antwortnummer bzw. Fragenummer angegeben wird. Folgendes Beispiel zeigt die indirekte Zitation der Antwort auf die Frage 1 der allgemeinen Fragen der Dokumentation des Interviews X: vgl. Anhang X, A1.

Den Interview-Teilnehmenden wurden zunächst drei allgemeine Fragen gestellt, um sicherzugehen, dass die Informationen bezüglich der Rolle und Berufserfahrung der Experten/Expertinnen richtig erfasst wurden (vgl. Anhang 7, A1-3). Der erste Fragenteil Stellhebel in Industrie-Unternehmen zur Erhöhung der Nachhaltigkeit durch digitale Technologien (S) stellt Fragen, die zur Identifikation besonders wichtiger Bereiche im Unternehmen (bspw. Produktionsbereiche) und besonders wichtiger Tätigkeiten und Prozesse im Unternehmen (bspw. Fertigungsprozesse) dienen. Die Experten/Expertinnen wurden auch befragt, ob in der Vergangenheit bereits Nachhaltigkeitsziele durch den Einsatz digitaler Technologien erreicht wurden und welche Bereiche als Stellhebel für die Nachhaltigkeitserreichung dienen. Auch Fragen zur Priorisierung einzelner digitaler Technologien wurden gestellt (vgl. Anhang 7, S1.1-3.4).

Im zweiten Fragenteil Systematisierung (SY) wurden den Interview-Teilnehmenden Fragen zur Bedeutung der Systematisierung der Nachhaltigkeitserreichung in den Unternehmen mit Schwerpunkt auf den Digitalisierungsprozessen gestellt. Die Experten/Expertinnen wurden bspw. befragt, ob es an der Institution bzw. in den Unternehmen in dem die Experten/Expertinnen tätig sind bereits Standards gibt, die Nachhaltigkeit im Management von Digitalisierungsprojekten bzw. im Arbeitsfluss dieser Projekte integriert. Die Experten/Expertinnen sollten bewerten, ob Phasen und Schritte der Standards in den SIA-DT Prozess mit aufgenommen werden müssen. Außerdem wurden die Teilnehmenden gefragt, wie hoch Sie den Nutzen eines nachhaltigkeitsintegrierten Managementansatzes, wie dem SIA-DT Prozessmodell, einschätzen. Die Experten/Expertinnen wurden zu den Rollen in Digitalisierungsprojekten, an denen die Experten/Expertinnen in der Vergangenheit teilnahmen, interviewt. Abschließend wurde untersucht, welche Hürden (organisatorisch, prozessual und kulturell) es für das Prozessmodell zu überwinden gilt, wenn man den SIA-DT Prozess im Unternehmen einführen würde (vgl. Anhang 7, SY1-6).

Der dritte Fragenteil Umweltmanagement (U) beschäftigt sich mit der Bedeutung von UMS und wichtigen Normen zu UMS wie der Norm DIN EN ISO 14001. Dieser Fragenteil wurde lediglich Experte/Expertin 2 vorgestellt, da die anderen Teilnehmenden eher eine Expertise im Digitalisierungsmanagement besitzen. Experte/Expertin 4 wurden bspw. die Fragen gestellt, welche Rahmenwerke und Standards für das betriebliche Umweltmanagement besonders wichtig sind und welche Managementsysteme durch den SIA-DT Prozess sinnvoll erweitert werden können. Insbesondere der Gedanke der Anknüpfung der Prozesse der kontinuierlichen Verbesserung an den SIA-DT Prozess, wie dem PDCA, wurde untersucht. Es wurden

ebenfalls Fragen zur Verankerung der UMS in der Unternehmensorganisation gestellt. Die Fragen zielen darauf ab, die wichtigsten Schnittstellen zwischen dem Umweltmanagement und dem Digitalisierungsmanagement in Unternehmen zu ermitteln und ob diese in den Schritten des SIA-DT Prozesses ausreichend einbezogen werden (vgl. Anhang 7, U1-13).

Der vierte Fragenteil Implementierung (I) beschäftigt sich mit Vorgehensmodellen zur Implementierung von digitalen Technologien. Hier wurden insbesondere der CRISP-DM und der DMME Prozess näher untersucht. Die Experten/Expertinnen wurden befragt, welche Relevanz die Vorgehensmodelle für das Management von Digitalisierungsprojekten in den Unternehmen / den Institutionen an den die Interviewteilnehmenden beschäftigt sind, aktuell haben. Die Experten/Expertinnen wurden ebenfalls darum gebeten einzuschätzen, ob sich die Vorgehensmodelle CRISP-DM und DMME als generelle Vorgehensmodelle für die Implementierung digitaler Technologien eignen. Da der SIA-DT Prozess auf dem DMME Prozess aufbaut, wurden die Experten/Expertinnen auch befragt, wie sie die Einbindung der DMME Prozessschritte im SIA-DT Prozess einschätzen. Außerdem wurden Fragen zu den empfohlenen Managementwerkzeugen für die ergänzten Schritte im SIA-DT Prozess gestellt (vgl. Anhang 7, I1-15).

Im fünften und abschließenden Fragenteil Use Cases (C), wurden einige Experten/Expertinnen zu Beispielen aus der Unternehmenspraxis gefragt. Es wurden Fragen zu vergangenen und geplanten Projekten gestellt und einige Anwendungsfälle digitaler Technologien identifiziert (vgl. Anhang 7, C1-5).

Da die Experten/Expertinnen unterschiedliche Hintergründe besitzen, wurden nicht allen Experten die gleichen Fragen gestellt. Einige der Experten/Expertinnen besitzen eine hohe Erfahrung und Expertise für UMS, andere für das Workflow-Management bei Digitalisierungsprojekten mit CRISP-DM und DMME und einige Experten/Expertinnen sind im Digitalisierungsmanagement tätig. Die Tabelle 13 zeigt, welche Fragen den Experten/Expertinnen gestellt wurden. Die Fragen, die in Klammern gesetzt sind, wurden als Back-up Fragen eingeplant. In allen Interviews konnten alle Fragen gestellt werden. Einige Fragen wurden gekennzeichnet, wenn diese an anderer Stelle beantwortet oder gänzlich übersprungen wurden.

**Tabelle 13:** Fragenauswahl aus Interviewleitfaden für die Experten/Expertinnen-Interviews

Expert	Questions	Count
Expert 1	A1-3, S1.1-3.4, C1-5, SY1-6, (I11-14)	22 (+4 Back-up)
Expert 2	A1-3, U1-13, I9-15	22 (+0 Back-up)
Expert 3	A1-3, S1.1-3.4, C1-5, SY1-6, (I11-14)	22 (+4 Back-up)
Expert 3	A1-3, I1-4, I7-14, SY1, SY4, (S3.1-3.4)	17 (+4 Back-up)

Quelle: Eigenerstellung

---

## 5.3 Diskussion

Im Nachfolgenden wird das SIA-DT Prozessmodell diskutiert. Grundlage der Diskussion sind die Ergebnisse der geführten Experten/Expertinnen-Interviews. Die Aussagen der Experten/Expertinnen werden verglichen und wichtige Kritikpunkte herausgestellt. Die nachfolgenden Unterkapitel sind die Oberbegriffe der wichtigsten Kritik Kategorien, in denen die Aussagen der Experten/Expertinnen eingeordnet werden. Ziel der Diskussion ist die Überprüfung des SIA-DT Prozessmodells.

### 5.3.1 Einsatz des SIA-DT als Managementprozess

Die Experten/Expertinnen wurden während der Interviews gefragt, ob ein Einsatz eines Management-Ansatzes wie dem SIA-DT Prozess positive Effekte auf die Erreichung der Nachhaltigkeitsziele in den Unternehmen hat. Die Teilnehmenden antworteten auf diese Frage unterschiedlich.

Experte/Expertin 3 schätzt den Einsatz des SIA-DT Prozesses für das Management von Digitalisierungsprojekten als sinnvoll ein und begründet dies mit dem Umfeld, in dem sich Firmen heute bewegen. Durch Stakeholder-Anforderungen, verschärfte gesetzliche Vorgaben, Regulatorik und Normen (s. Kapitel 2.3) sind Unternehmen gezwungen sich mit der Erreichung von Nachhaltigkeitszielen zu beschäftigen. Experte/Expertin 3 stellt neben der unbestreitbaren moralischen Verpflichtung der Unternehmen heraus, dass es auch klare wirtschaftliche Faktoren gibt, um sich mit Nachhaltigkeit zu beschäftigen (vgl. Anhang 10, SY1). Experte/Expertin 4 äußert eine ähnliche Einschätzung. Eine akzeptierte Vorgehensweise bzw. Roadmap, die ein methodisches Vorgehen vorgibt, ist immer hilfreich, wenn die einzelnen Phasen des Modells nachvollziehbar und logisch aufgebaut sind. Das SIA-DT Prozessmodell dient in der Praxis als Arbeitsunterstützung, so Experte/Expertin 4 (vgl. Anhang 11, SY1). Auch aus Sicht des Umweltmanagements in Unternehmen, ist das SIA-DT Prozessmodell nutzenbringend, wenn es richtig umgesetzt wird, da der Prozess die Verteilung von Budgets begründet, so Experte/Expertin 2 (vgl. Anhang 9, U12). Experte/Expertin 4 ergänzt, dass die Verteilung von Ressourcen auch aus Sicht der Digitalisierung entscheidend ist, da die Verteilung bestimmt, wie sehr der Fokus auf Nachhaltigkeit bei Digitalisierungsprojekten gelegt wird (vgl. Anhang 11, I4).

Experte/Expertin 3 beschreibt das Digitalisierung und Nachhaltigkeit, in der produzierenden Industrie, relativ neue Themen sind. Die Kombination beider Themen bringt den größten Mehrwert. Prozessansätze aus dem Bereich des Digitalisierungsmanagements, wie den CRISP-DM oder den DMME Prozess, um Nachhaltigkeitsaspekte zu erweitern und somit eine systematische Verknüpfung beider Themenfelder zu erzielen, schätzt Experte/Expertin 3 als sehr sinnvoll ein. Für die Identifikation von Möglichkeiten zur Optimierung von Nachhaltigkeit ist es nützlich, einen prozessualen Ansatz zu verfolgen. Das Prozesswissen das im Zuge der Digitalisierungsprojekte gebildet wird, kann so um Nachhaltigkeitsaspekte erweitert werden. Die Verknüpfung von Nachhaltigkeit und Digitalisierung erhöht das Verständnis dafür, wie wichtig die digitalen Technologien für die Erreichung von Nachhaltigkeitszielen sind, so Experte/Expertin 3 (vgl. Anhang 10, SY1).

Eine wichtige Herausforderung die bezüglich des Einsatzes des SIA-DT als Managementprozess bei Digitalisierungsprojekten besteht, ist die Akzeptanz im Unternehmen gegenüber Nachhaltigkeit allgemein, beschreibt Experte/Expertin 4. Die Akzeptanz für nachhaltigkeitsintegrierte Prozesse muss im Unternehmen,



---

in dem der SIA-DT zum Einsatz kommt, vorhanden sein, oder geschaffen werden. Experte/Expertin 4 betont die Nachhaltigkeit von der Geschäftsführung als Geschäftsziel aufgenommen werden muss und daher bereits bei der Definition der Problemstellung der Digitalisierungsprozesse Relevanz besitzt. Das SIA-DT Prozessmodell wird anschließend eingesetzt, um die definierten Ziele zu erreichen. Wichtig für den Erfolg des Projektes ist dabei die Ermöglichung der Zusammenarbeit zwischen den Prozessbeteiligten wie der Konstruktion, der Fertigungssteuerung, dem Prozessverantwortlichen und dem Data Science Bereich (vgl. Anhang 11, SY1).

Eine entscheidende und bewusst gewählte Einschränkung, die der SIA-DT Prozess mit sich bringt, ist die Ausrichtung des Prozesses auf digitale Technologien. Durch den Fokus auf die Erweiterung des DMME und CRISP-DM Prozessmodells, ist der Ansatz des SIA-DT Prozesses auf Technologien beschränkt, die datengetrieben und modellbasiert sind. Er eignet sich dabei besonders für Technologien, die an bestehende Datensysteme angeschlossen werden. Die Experten/Expertinnen wurden gefragt, ob der SIA-DT Prozess geeignet ist, um auch für andere digitale Technologien als der KI als Implementierungs- und Prozessmodell genutzt zu werden.

Experte/Expertin 4 beschreibt, dass alle digitalen Technologien auf Modellen basieren. Auch wenn andere Fachgebiete betroffen sind, bleiben viele Schritte im Arbeitsfluss gleich. Abteilungen, die im SIA-DT Prozess angesprochen werden, wie die Data Science Abteilung, das Produktionsmanagement und die Anlagenexperten/-expertinnen, sind auch für die Implementierung anderer Technologien wichtige Stakeholder. Es ist entscheidend, dass die verschiedenen Schritte des Prozesses die jeweiligen Stakeholder mit den benötigten Daten und der Aufbereitung der Daten (z. B. Visualisierungen) versorgen, um die verschiedenen Rollen bei nachhaltigkeitsbezogenen und technologischen Entscheidungen zu unterstützen. Der Unterschied zwischen verschiedenen digitalen Technologien liegt lediglich in der Art und Weise der technischen Bereitstellung. Die Nutzung des DMME Prozessmodells bei anderen Technologien funktioniert dann, wenn die jeweiligen Informationsbedarfe der Stakeholder gedeckt werden. Experte/Expertin 4 schätzt den Einsatz des DMME Prozessmodells (und folglich auch des SIA-DT Prozesses) für die Implementierung anderer digitaler Technologien als generell anwendbar ein (vgl. Anhang 11, I3).

Die Anwendung des SIA-DT Prozessmodells in kleineren Unternehmen ist schwierig, so Experte/Expertin 1. Prozessuale Ansätze im Management von Digitalisierungsprojekten sind immer dann wichtig, wenn die Projekte und das Unternehmen viele Mitarbeitende haben. In diesem Fall sind Ansätze wie der SIA-DT sinnvoll um den Arbeitsaufwand und die -abläufe zu strukturieren. Im Unternehmen in dem Experte/Expertin 1 tätig ist, werden Projekte nicht immer von großen Projektteams begleitet und daher wäre ein Vorgehen nach dem SIA-DT Prozessmodell schwierig. In frühen Projektphasen wird lieber mit technischen Piloten gearbeitet, da diese die größten Erkenntnisse bringen. Insgesamt schätzt Experte/Expertin 1 Digitalisierungsprojekte, insbesondere aufgrund des schnellen Wachstums des Unternehmens in dem Experte/Expertin 1 tätig ist, als sehr dynamisch und agil ein. Die Orientierung an strengen Prozessschemata ist in diesem Fall nicht sinnvoll, so Experte/Expertin 1 (vgl. Anhang 8, SY1, SY2, C2). Für einen erfolgreichen Einsatz des SIA-DT Prozessmodells in Unternehmen verschiedener Größen ist die Skalierbarkeit bedeutend. Experte/Expertin 2 schätzt den SIA-DT Prozess als skalierbar ein. In größeren Unternehmen wird der SIA-DT Prozess, so Experte/Expertin 2, aufgrund seiner Struktur jedoch besser einsetzbar und skalierbar sein als in kleinen Unternehmen (vgl. Anhang 9, I9). Diese Aussage deckt sich mit den Aussagen der anderen Experten. Das SIA-DT Prozessmodell ist besser für größere Unternehmen geeignet, in denen die

---

einzelnen Rollen und Funktionsbereiche zur Verfügung stehen und entsprechende Ressourcen für die Durchführung der einzelnen Schritte im SIA-DT Prozess bereitgestellt werden können. Experte/Expertin 2 gibt auch an, dass der Prozess bei entsprechender Anpassung und Reduzierung der benötigten Ressourcen, in kleinen Unternehmen umgesetzt werden kann. Eine Schwierigkeit besteht auch in der Nutzung des Prozesses bei sozialen und ökologischen Projekten, da diese teils sehr unterschiedliche Anforderungen mit sich bringen (vgl. Anhang 9, I9).

Experte/Expertin 3 beschreibt, dass bei Digitalisierungsprojekten ein anwendungsorientierter Ansatz verfolgt wird. Der Ansatz folgt einem gleichbleibenden Schema, bei dem zunächst von Shop-Floor Fachkräften ein Problem identifiziert wird, welches dann von den Digitalisierungsexperten durch den Einsatz einer Technologielösung behoben wird. Erfolgsentscheidend ist eine durchgängige Einbindung der Anwendenden, bei dem der Nutzen aus dem Einsatz der digitalen Technologie kommuniziert wird (vgl. Anhang 10, S2). Dieser Aussage von Experte/Expertin 3 ist zu entnehmen, dass eine Anwendungsorientierung wichtig für den Einsatz digitaler Technologien ist und demnach auch beim Management von Digitalisierungsprojekten. Erfolgsentscheidend ist laut Experte/Expertin 4 auch die Verfügbarkeit, Messbarkeit und eine hohe Qualität von Nachhaltigkeitsdaten (vgl. Anhang 11, I7, I8).

Die Experten/Expertinnen weisen darauf hin, dass der Erfolg des Einsatzes des SIA-DT Prozessmodells entscheidend von den Charakteristiken der Unternehmen abhängt, in denen der SIA-DT Prozess implementiert wird. Zum einen ist dies die bereits vorhandene Systematisierung von Nachhaltigkeit im Unternehmen, auf die im nächsten Kapitel 5.3.2 eingegangen wird. Andererseits ist der Einsatz eines komplexen standardisierten Prozessmodells wie dem SIA-DT in agilen Unternehmen mit schnellem Wachstum schwieriger. Das SIA-DT Prozessmodell muss für den Einsatz in kleinen Unternehmen mit weniger differenzierten Rollen und Ressourcen weiter evaluiert werden. Es stellt sich die Frage, welche Art der weitergehenden Evaluation des Prozessmodells am geeignetsten ist. Da für das SIA-DT Prozessmodell aufgrund seiner Neuheit, noch kein breites Verständnis vorhanden ist, ist eine großangelegte Befragung zur weiteren Evaluation nicht sinnvoll, so Experte/Expertin 2. Die Anwendung des Modells in einem Use Case, ggf. in Verbindung mit weiteren Experten /Expertinnen-Interviews, ist sinnvoller (vgl. Anhang 9, I10).

### **5.3.2 Umweltmanagementsysteme und Einbettung des SIA-DT Prozesses**

Wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben, wurde im Rahmen dieser Arbeit die Bedeutung und Funktion von Umweltmanagementsystemen und anderen Zielsystemen für die Erreichung von Nachhaltigkeit untersucht. In den Experten/Expertinnen-Interviews wurde Experte/Expertin 2 zum Thema Umweltmanagementsysteme befragt. Auch Experte/Expertin 2 schätzt die Norm DIN EN ISO 14001 als wichtigste Norm im Bereich des Umweltmanagements ein. Die Norm DIN EN 26000, die in dieser Arbeit ebenfalls vorgestellt wird, ist nicht ganz so weit verbreitet. Die aktuell wichtigsten Anforderungen für Unternehmen sind die gesetzlichen Anforderungen. Die CSRD und das Lieferkettengesetz sind am wichtigsten. Die neuen Regularien sind wesentliche Treiber für Nachhaltigkeit in Unternehmen. Im Bezug zur Entwicklung nachhaltiger Produkte ist auch die Norm, in der das Life Cycle Assessment beschrieben wird, wichtig. Auch wenn die neuen gesetzlichen Anforderungen die größte Bedeutung für Unternehmen besitzen, werden die Normen DIN EN ISO 14001 und andere Normen nicht an Relevanz verlieren (vgl. Anhang 10, U1).

---

Wie in Kapitel 4.3.1 der Arbeit beschrieben, wird das UMS der Norm DIN EN ISO 14001 als geeignet angesehen, um den SIA-DT Prozess in Unternehmen zu integrieren. Wie beschrieben ist es besonders wichtig, dass in Unternehmen, in denen der SIA-DT Prozess eingeführt wird, bereits eine Systematisierung von Nachhaltigkeit vorliegt. Diese Arbeit geht davon aus, dass Unternehmen, die ein UMS nach der Norm DIN EN ISO 14001 einführen, eine Systematisierung der Nachhaltigkeit im Unternehmen verfolgen. Zur Überprüfung der Argumentation wurde Experte/Expertin 2 befragt, welches Managementsystem besonders für die Integration des SIA-DT Prozesses geeignet ist. Experte/Expertin 2 weist darauf hin, dass das Umweltmanagementsystem nach der Norm DIN EN ISO 14001 und das Managementsystem der SBSC unterschiedliche Ziele verfolgen. Während das UMS der Norm grundsätzliche Anforderungen definiert, wie ein Unternehmen systematisch Nachhaltigkeitsziele erreichen kann und eine Zertifizierung dieser Fähigkeit ermöglicht, setzt die SBSC den Fokus auf die Gestaltung der inhaltlichen Ausprägung des Nachhaltigkeitsmanagements. Wie in den entsprechenden Kapiteln beschrieben, geschieht dies bspw. mit Umweltkennzahlen und Ursache-Wirkungsketten. In Unternehmen können auch beide Systeme vorliegen und ausgestaltet sein (vgl. Anhang 9, U3).

Experte/Expertin 2 beschreibt, dass verschiedene Systeme, wie das UMS der DIN EN ISO 14001 und die SBSC ähnlich gut für die Integration des SIA-DT Prozesses geeignet sind. Der Fokus liegt hierbei nicht auf dem System selbst, sondern auf der Umsetzung des Managementsystems und des Vorhandenseins eines systematischen Denkens, bezogen auf die Nachhaltigkeitserreichung. Dieses systematische Denken wird sowohl durch die SBSC als auch durch das UMS der Norm DIN EN ISO 14001 gefördert. Experte/Expertin 2 schätzt das UMS der Norm ISO 14001 jedoch als geeigneter ein, wenn es um die Bereitstellung von Ressourcen geht. Die Bereitstellung von Ressourcen ist in der Norm deutlich strikter vorgegeben als es bei der SBSC der Fall ist. Bei der SBSC liegt mehr Gestaltungsfreiheit bei den Unternehmen. Die SBSC besitzt wesentlich weniger konkrete Handlungsanleitungen im Vergleich zur Norm ISO 14001. Dennoch kann ein Unternehmen, das eine SBSC umfänglich und unter Bereitstellung von entsprechenden Ressourcen umsetzt, genauso geeignet sein. Ein zweiter Vorteil, den das UMS der Norm DIN EN ISO 14001 besitzt, ist die Zertifizierbarkeit (vgl. Anhang 9, U4). Die Aussagen von Experte/Expertin 2 bestätigen die Annahmen in Kapitel 4.3.1. Gerade durch die Zertifizierbarkeit ist das UMS der Norm DIN EN ISO 14001 besonders geeignet für eine Integration und weitergehende Validierung des SIA-DT Ansatzes.

Experte/Expertin 2 beschreibt, dass kleinere Unternehmen seltener zertifizierte Managementsysteme besitzen. Dies gilt insbesondere für das Nachhaltigkeitsmanagement (vgl. Anhang 9, U5). Diese Aussage deckt sich mit Aussagen von Experte/Expertin 1, welche in Kapitel 5.3.1 aufgeführt sind. Experte/Expertin 1 beschreibt, dass in dem Unternehmen in dem Experte/Experte 1 tätig ist, keine strengen Vorgaben und Standards für die Projektphasen bei Digitalisierungsprojekten vorhanden sind. Lediglich der Roll-out Prozess ist standardisiert. Experte/Expertin 2 beschreibt ebenfalls, dass das Vorhandensein von zertifizierten Managementsystemen stark branchenabhängig ist. In der Automobil- und Maschinenbauindustrie wo die Zertifizierung von OEMs (Original Equipment Manufacturer, deutsch: Erstausrüster) in der Lieferkette gefordert wird, seien diese Systeme verbreiteter. Die Branche und die Größe des Unternehmens sind daher entscheidende Kriterien (vgl. Anhang 9, U5).

Die Schnittstellen der UMS und der Digitalisierungsprozesse sind, so Experte/Expertin 2, unternehmensspezifisch. Umweltmanagementprozesse und Digitalisierungsprozesse gehen aber immer häufiger Hand in Hand. Gerade die neuen gesetzlichen Anforderungen, die auf die Unternehmen zukommen, machen

---

eine manuelle Dokumentation und Verarbeitung der äußerst vielfältigen Nachhaltigkeitsdaten, die Unternehmen zukünftig offenlegen müssen, nicht mehr möglich. Der Dokumentationsprozess von Nachhaltigkeitsdaten ist heute in den meisten Unternehmen bereits digitalisiert. Experte/Expertin 2 beschreibt das andere Prozesse, wie die Erfassung, die Bewertung, das Nachverfolgen und die Umsetzung von Maßnahmen bezüglich Umweltauswirkungen oft noch nicht digitalisiert sind. Gerade in KMU werden Daten teils noch manuell erfasst. Es werden hierzu bspw. Abfälle abgewogen oder Treibhausgasemissionen händisch berechnet. Selten werden diese Kennwerte automatisiert ermittelt und in die Datenbanken gespeist. Zukünftig werden diese Aufgaben digitalisiert (vgl. Anhang 9, U8). Diese Aussage von Experte/Expertin 2 deckt sich mit dem Ziel des letzten SIA-DT Schritts (s. Kapitel 4.6.5). Im letzten SIA-DT Schritt muss die implementierte Technologie an das digitale Ökosystem und insbesondere die Datenspeicher des Unternehmens angeschlossen werden. Hierzu gehört, dass die Nachhaltigkeitsdaten automatisch übermittelt werden. Durch die IT-Systeme des Unternehmens kann dann eine automatische Berechnung der Nachhaltigkeitskennzahlen erfolgen. Die Aussage von Experte/Expertin 2 unterstützt das Design des SIA-DT Prozessmodells indem frühzeitig eine Kommunikation zwischen den Nachhaltigkeitsexperten und -expertinnen und der Digitalisierungsabteilung hergestellt wird.

Das SIA-DT Prozessmodell legt den Fokus auf die Implementierung einer digitalen Technologie unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskennzahlen, sowie dem Anschluss der Technologie an Schnittstellen und das Datenmanagement für die (Nachhaltigkeits-) Daten, die mit dieser Technologie erzeugt werden. Die Übertragung der Daten an das Umweltmanagement und das Reporting des Unternehmens ist ein eigenständiger Prozess. Experte/Expertin 2 beschreibt, dass der SIA-DT Prozess bis zur Datenermittlung und -einspeisung in die bestehenden Systeme reicht und wie das Management aus diesen Daten Nutzen generiert. Wie diese kommuniziert werden, muss aber in anderen Prozessen entschieden werden (vgl. Anhang 9, U9). Die Aussage von Experte/Expertin 2 zeigt, dass der Schwerpunkt des SIA-DT Prozesses verstanden wird. Der Prozess dient zur nachhaltigkeitszielgetriebenen Technologieauswahl, der Implementierung der Technologie und Anbindung an die IT-Systeme.

Nachhaltigkeitsziele werden bei Entscheidungen innerhalb des SIA-DT Prozesses vorrangig berücksichtigt. Risiken sowie positive Auswirkungen der Implementierung der betrachteten Technologie auf Nachhaltigkeitsziele werden untersucht. Diese Arbeit schlägt vor, sich an der TBL zu orientieren (s. Kapitel 2.2.2) und Nachhaltigkeitskennzahlen aus den Bereichen der ökologischen, sozialen und ökonomischen Nachhaltigkeit zu betrachten. Auch hierzu wurden die Experten/Expertinnen, wie das nächste Kapitel zeigt, befragt.

### **5.3.3 Nachhaltigkeitsziele und klassische Ziele**

Wie stark die ökologischen, sozialen sowie ökonomischen Ziele in den Bewertungs- und Auswahlritten der digitalen Technologien im SIA-DT Prozess differenziert werden, ist ein weiterer Diskussionspunkt. Ob in Unternehmen zwischen ökologischen, sozialen und ökonomischen Zielen bei Entscheidungsprozessen differenziert wird, ist Gegenstand der Diskussion. Eine mangelnde Differenzierung erschwert die Integration des SIA-DT Prozessmodells im Unternehmen.

Im Unternehmen in dem Experte/Expertin 1 tätig ist, wird bei Digitalisierungsprojekten kaum zwischen ökonomischer und sozialer / ökologischer Nachhaltigkeit differenziert. Begründet wird dies mit den synergetischen Effekten bei der Optimierung von Nachhaltigkeit in der Industrie. Die Optimierung der

---

Logistik-Wege, so das Beispiel von Experte/Expertin 1, führt zu weniger Verkehr von Werksfahrzeugen und damit zur Energie-Einsparung. Gleichzeitig wird weniger Reifenabrieb erzeugt. Auch die Beschäftigten werden geschont und können mehr Zeit für andere Tätigkeiten nutzen. Die Logistikkosten können ebenfalls reduziert werden (vgl. Anhang 8, S3.1)

Neben den bisher genannten Diskussionspunkten zum SIA-DT Prozess, gibt es prozessuale und kulturelle Hürden, die der SIA-DT Prozess überwinden muss, um im Unternehmen erfolgreich eingesetzt zu werden. Diese Hürden können organisatorisch (teilweise in Kapitel 5.3.2 betrachtet), prozessual und kulturell sein. Das nachfolgende Kapitel beschäftigt sich mit diesen Hürden.

#### **5.3.4 Hürden und Anreize für den SIA-DT Prozess**

Im Unternehmen in dem Experte/Expertin 1 tätig ist, ist der starke unternehmenskulturelle Fokus auf Flexibilität und Selbständigkeit der Mitarbeitenden eine Hürde für das SIA-DT Prozessmodell, da dieser strenge Vorgaben an den Arbeitsfluss in Digitalisierungsprojekten macht. Mit der Einführung eines komplexen Standards wie dem SIA-DT Prozessmodell ist ebenso ein Zeitaufwand verbunden, welcher im derzeit schnell wachsenden Unternehmen besser genutzt werden kann, um weitere Projekte umzusetzen. Durch die bisherige Arbeitsweise fehlt im Unternehmen die Akzeptanz gegenüber umfassenden Prozessmodellen, so Experte/Expertin 1. Wenn eine Vielzahl von Projekten parallel durchgeführt wird, was aktuell im Unternehmen in dem Experte/Expertin 1 tätig ist noch nicht der Fall ist, dann wird die Einführung eines Standards wie dem SIA-DT Prozessmodell wichtiger (vgl. Anhang 8, SY4).

Experte/Expertin 4 gibt an, dass der DMME Prozess, auf dem das SIA-DT Prozessmodell aufbaut neu ist. Das CRISP-DM Modell, welches dem DMME Prozess zugrunde liegt, ist etwas länger im Einsatz, dafür aber weniger auf Industrieanwendungen ausgerichtet. Für die Integration von Nachhaltigkeitszielen bei der Digitalisierung muss eine Akzeptanz in den Unternehmen geschaffen werden. Experte/Expertin 4 gibt an, dass die Akzeptanz umso größer ist, desto mehr bereits vorhandene und verstandene Prozesse um Nachhaltigkeitsaspekte erweitert werden. Die Akzeptanz gegenüber Nachhaltigkeitszielen in Digitalisierungsprojekten zu erhöhen, gelingt, indem man zeigt, dass Nachhaltigkeit in Prozessen wie dem DMME integriert werden kann (vgl. Anhang 11, SY4). Auch Experte/Expertin 2 und Experte/Expertin 3 beschreiben, dass der Reifegrad des Unternehmens in Bezug auf Nachhaltigkeit und Digitalisierung entscheidend ist, wenn der SIA-DT Prozess implementiert wird. Bei stark IT-getriebenen Unternehmen, ist die Umsetzung des SIA-DT Prozessmodells leichter. Bei wenig IT-getriebenen Unternehmen ist die Umsetzung schwerer. Experte/Expertin 2 betont, dass es wichtig ist, wie Nachhaltigkeit in der obersten Leitung des Unternehmens verankert ist. Die Investition von Budget in die Implementierung des SIA-DT Prozesses kann von Unternehmen als Risiko wahrgenommen werden, da dieses Budget folglich an anderer Stelle fehlt (vgl. Anhang 9, U11; Anhang 10, SY5).

Um Anreize für die Umsetzung des SIA-DT Prozessmodells zu identifizieren, wurde Experte/Expertin 2 gefragt, wie Unternehmen motiviert werden können, den SIA-DT Prozess einzuführen und welche Faktoren hierfür eine Rolle spielen. Experte/Expertin 2 weist darauf hin, dass es Treiber gibt, welche die Unternehmen zur Umsetzung eines UMS und entsprechenden Prozessen bewegt. Die kommenden neuen Regularien und Vorgaben wie die CSRD fordern von den Unternehmen eine umfangreiche Erfassung, Verarbeitung und Kommunikation von Nachhaltigkeitsdaten, welches ohne Digitalisierung nicht umgesetzt

---

werden kann. Je größer das Unternehmen ist, desto weniger können die Anforderungen ohne digitalisierte Prozesse eingehalten werden. Auch die Anforderungen, welche nicht auf die Berichterstattung ausgelegt sind, sondern materieller Form sind, werden zukünftig zu stärkerer Digitalisierung führen. Die neuen Anforderungen fordern in einigen Bereichen eine digitale Berichterstattung für Nachhaltigkeitsdaten und machen damit eine digitale Datenverarbeitung notwendig. Diese Anreize für Unternehmen führen zur Umsetzung von Prozessen, wie dem SIA-DT Prozess. Experte/Expertin 2 beschreibt das neben der CSRD auch das Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz die Digitalisierung in den Unternehmen treiben wird, da zur Einhaltung des Gesetzes Daten aus der gesamten Wertschöpfungskette nötig sind. Die Regularien erzeugen einen hohen Druck auf die Unternehmen, welcher ein starker Treiber für die Digitalisierung sein wird (vgl. Anhang 9, U13).

### 5.3.5 Integration der kontinuierlichen Verbesserung

Um bei der Durchführung des SIA-DT Prozesses im Unternehmen die Verbesserungspotenziale konsequent einzuarbeiten und verbesserte Standards für die Durchführung der Arbeitsschritte des SIA-DT Prozessmodells zu schaffen, sind Ansätze der kontinuierlichen Verbesserung (s. Kapitel 4.3.4) geeignet. Hierzu wurden Experte/Expertin 2 Fragen gestellt. Überprüft wurde, ob der bekannte PDCA-Prozess in das SIA-DT Prozessmodell integriert werden kann.

Experte/Expertin 2 betont, dass das Vorgehen nach dem PDCA-Zyklus in den einzelnen Phasen des SIA-DT Prozesses nicht sinnvoll ist, da der PDCA mit seiner Planen, Durchführen, Überprüfen und Handeln Struktur eine genaue Abfolge von Aufgaben vorgibt, die aber nicht der Abfolge der Arbeitsschritte des SIA-DT Prozessmodells in den einzelnen Phasen entspricht (vgl. Abbildung 18). Experte/Expertin 2 beschreibt, dass der PDCA-Zyklus nicht spezifisch für die Norm DIN EN ISO 14001 ist, sondern ein allgemeines Vorgehen bei Verbesserungsaufgaben beschreibt (vgl. Anhang 9, I15).

Der PDCA-Zyklus wird im SIA-DT als Prozess der kontinuierlichen Verbesserung vorgeschlagen, da so Verbesserungspotenziale und Optimierungsmöglichkeiten, welche im Rahmen des (Quality-) Gates am Ende einer Phase identifiziert werden, durch die Planung von Maßnahmen, die Durchführung der Maßnahmen und die Überprüfung der Wirksamkeit der Maßnahmen sowie Schaffung neuer Standards für die Phase des SIA-DT Prozessmodells verbessert werden. In Abbildung 18 wurden Zykluspeile über jeder Phase ergänzt. Dies zeigt, dass der Gedanke der kontinuierlichen Verbesserung in den einzelnen Phasen integriert wird. Abbildung 20 zeigt, dass bei einer Entscheidung für Nacharbeit am Gate einer Phase des SIA-DT Prozessmodells, der Unterprozess der kontinuierlichen Verbesserung adressiert wird. Dieser Prozess referenziert auf den PDCA-Prozess oder einen anderen im Unternehmen genutzten Prozess der kontinuierlichen Verbesserung.

Die Kritik von Experte/Expertin 2 ist wichtig um hervorzuheben, dass nicht die Arbeitsschritte einer SIA-DT Phase der PDCA-Logik folgen, sondern im Falle der Nacharbeit oder Korrektur der Arbeitsschritte einer Phase, auf den PDCA-Prozess zurückgegriffen wird, um Maßnahmen nach der Plan, Do, Check, Act Logik strukturiert umzusetzen. Da Experte/Expertin 2 lediglich Abbildung 18 präsentiert wurde, indem die Zykluspeile über jeder Phase in der Legende ursprünglich mit PDCA betitelt waren, war dies missverständlich. Abbildung 20 zeigt hier eine detaillierte Aufschlüsselung. In Abbildung 18 werden die Zykluspeile in der Legende jetzt mit kontinuierlicher Verbesserung bezeichnet. Außerdem wurde das Kapitel 4.3.4

---

angepasst, um den Einsatzzweck des PDCA und dessen Schritten besser von den Arbeitsschritten des SIA-DT Prozesses zu trennen. Die Modellierung des SIA-DT Prozesses in der BPMN 2.0 Modellierungskonvention ist detailreich und zeigt eine genauere Darstellung der Situationen, in denen der PDCA-Prozess initiiert wird.

### 5.3.6 Integration des DMME und SIA-DT

Experte/Expertin 4 besitzt eine hohe Expertise für die Strukturierung des Workflows bei Digitalisierungsprojekten. Da diese Arbeit auf den Schritten des DMME Prozesses aufbaut, wurde Experte/Expertin 4 zur Integration der Arbeitsschritte des DMME Prozesses in den Phasen des SIA-DT Prozess befragt.

Experte/Expertin 4 beschreibt den DMME Prozess als Standard für Digitalisierungsprojekte. Der DMME stellt einen Leitfaden bereit, nach denen Digitalisierungsprojekte in der Produktion, unter Berücksichtigung der Anwendersicht, strukturiert werden. Während der CRISP-DM Prozess von einer bereits vorhandenen Datengrundlage zu Beginn des Prozesses ausgeht, ergänzt der DMME Prozess technische Arbeitsschritte zur Schaffung des Verständnisses des technischen Umfelds und der Installation der benötigten Sensorik für die Datenaufnahme (vgl. Anhang 11, I1). Experte/Expertin 4 bestätigt die Argumentation dieser Arbeit, dass sich der DMME Prozess insbesondere durch den höheren technischen Bezug und die bessere Anwendbarkeit in der Industrie gegenüber dem CRISP-DM Prozess auszeichnet. Auch wenn der DMME Prozess noch nicht für die Anwendung bei anderen digitalen Technologien als der KI-Technologie untersucht wurde, schätzt Experte/Expertin 4 den Prozess, für die Implementierung anderer digitaler Technologien als anwendbar ein (vgl. Anhang 11, I2, I3). Bei Erweiterung des DMME Prozesses um Nachhaltigkeitsziele kommt es nach Angabe von Experte/Expertin 4 vor allem darauf an, dass Nachhaltigkeitsdaten in der technischen Konzeptionierung und Modellierung aufgenommen werden. Die Daten werden zur Optimierung der Technologien genutzt. Gleichermaßen muss das Feedback der Technologien in einen Regelkreis einfließen und aktiv zur Steuerung von Prozessen genutzt werden (vgl. Anhang 11, I4). Die Kritik von Experte/Expertin 4 zeigt, dass neben der nachhaltigkeitsorientierten Technologieauswahl, bei der technischen Modellierung eine Integration von Nachhaltigkeitsdaten entscheidend ist. Der zyklische Gedanke den Experte/Expertin 4 beschreibt ist im SIA-DT Prozess enthalten, da eine Nutzung der Daten der digitalen Technologie und Anbindung an die IT-Systeme des Unternehmens gefordert wird.

Experte/Expertin 4 beschreibt, dass eine Integration von Nachhaltigkeit in den Phasen des DMME Prozesses immer dann erfolgt, wenn Nachhaltigkeit als Zielgröße im Entwicklungsprozess aufgenommen wird. Geschieht dies, wird Nachhaltigkeit auch in den einzelnen Arbeitsschritten des DMME Prozesses integriert. Da das DMME Prozessmodell ein Modell auf der Metaebene ist, stellt sich grundsätzlich die Frage, ob zusätzliche Phasen ergänzt werden, oder die Inhalte der im SIA-DT ergänzten Phasen in die bestehenden Arbeitsschritte des DMME Prozesses aufgenommen werden (vgl. Anhang 11, I7, I8). Experte/Expertin 4 beschreibt, dass auch eine Risikoanalyse im DMME Prozessmodell enthalten ist, da das Modell durch Konfusionsmatrix oder Kennwerte wie der Modell Genauigkeit evaluiert wird. Auch das DMME Prozessmodell ist, wie der SIA-DT Prozess, iterativ (vgl. Anhang 11, I8). Die Aussagen von Experte/Expertin 4 zeigen, dass der DMME, je nach Verständnis des Prozessmodells sowohl Aspekte der Nachhaltigkeit als auch eine technische Risikoanalyse integriert. Außerdem wird ein iterativer Ansatz verfolgt. Die Aussagen stützen die Eignung des DMME Prozessmodells als Grundlage des SIA-DT Prozessmodells. Andere

---

Experten/Expertinnen geben an, dass das CRISP-DM oder DMME Prozessmodell nicht als nachhaltigkeitsintegrierte Modelle einzusetzen oder bisher nur einzelne Schritte dieser Prozessmodelle in Anwendung sind (vgl. Anhang 8, C2, SY1; Anhang 10, SY1, I1). Der Bedarf einer nachhaltigkeitsorientierten Anpassung des DMME Prozesses ist daher gegeben.

Welche Arbeitsschritte in der Praxis bei Digitalisierungsprojekten durchlaufen werden und welche Rolle Nachhaltigkeit bei Digitalisierungsprojekten in der Industrie aktuell spielt, wird im nachfolgenden Kapitel diskutiert.

### 5.3.7 Arbeitsschritte und Rollen bei Digitalisierungsprojekten und im SIA-DT Prozess

Während der Experten/Expertinnen-Interviews wurden einige Interview-Teilnehmende gefragt, ob es in dem Unternehmen / an der Institution, an der diese tätig sind, einen Standardprozess gibt bzw. nach welchen Schritten oder in welche Phasen die Digitalisierungsprojekte, an denen die Experten/Expertinnen bereits teilgenommen haben, aufgeteilt waren. Dieses Kapitel soll anhand der Antworten der Experten überprüfen, ob gängige Vorgehensweisen in der Praxis den Schritten des entwickelten SIA-DT Prozessmodells gleichen. Ebenfalls wird untersucht, welche Rollen an Digitalisierungsprojekten teilnehmen müssen.

Experte/Expertin 1 beschreibt im Interview, dass die Digitalisierungsprojekte meist von einer kleineren Anzahl an Mitarbeitenden getrieben werden und diese interdisziplinär arbeiten (vgl. **Anhang 8, C4**). Auch Experte/Expertin 3 beschreibt eine interdisziplinäre Zusammenarbeit von verschiedenen Rollen bei Digitalisierungsprojekten. Die im SIA-DT Prozessmodell aufgeführten Rollen schätzt Experte/Expertin 3 als ausreichend für die Durchführung von Digitalisierungsprojekten ein (vgl. Anhang 10, SY6). Experte/Expertin 3 stellt die Fertigung und die Anwender der zu implementierenden Technologie als wichtigste Partei im Prozess dar. Grundsätzlich wird bei Digitalisierungsprojekten zunächst das zu lösende Problem identifiziert und die Bedeutung und Skalierbarkeit von Lösungen für diese Problemstellung untersucht. Danach wird der Business Case aufgestellt. Ist der Business Case attraktiv und die Lösung auf mehreren Anlagen einsetzbar, werden erste Prototypen getestet. Experte/Expertin 3 beschreibt, dass der Ansatz sehr anwendungsbezogen ist. Die Durchgängige Einbindung der Anwender und die Kommunikation des Nutzens der Lösung sind erfolgsentscheidend bei Digitalisierungsprojekten, so Experte/Expertin 3 (Anhang 10, C2, C4). Neben der IT arbeiten auch andere Funktionsbereiche an der Umsetzung der Projekte mit. Die Rollen sind für die Projekte aber nicht fest vorgegeben. Für den Roll-out neuer Technologien gibt es einen Standardprozess im Unternehmen, indem Experte/Expertin 1 tätig ist (vgl. Anhang 8, C4). Digitalisierungsprojekte werden grundsätzlich in Ideenphase, Pilotprojekt und Roll-out Phase unterteilt, so Experte/Expertin 1. Stärkere Untergliederungen werden je nach Anwendungsfall getroffen (vgl. Anhang 8, SY1). An dieser Aussage ist erkennbar, dass in kleineren Unternehmen, die sich im schnellen Wachstum befinden, der Einsatz eines umfassenden Prozessmodells schwieriger ist. Experte/Expertin 1 weist ebenfalls darauf hin, dass die Einführung digitaler Technologien und das Vorantreiben von Nachhaltigkeit im Unternehmen in dem Experte/Expertin 1 arbeitet in unterschiedlichen Funktionsbereichen verankert ist. Zukünftig sollen Organisationseinheiten, wie eine globale Produktionssteuerung, eingeführt werden die neben der Optimierung der Effizienz der Produktion auch die Nachhaltigkeit des Unternehmens vorantreibt, so Experte/Expertin 1 (vgl. Anhang 8, SY1). Die Antwort von Experte/Expertin 1 zeigt, dass auch in kleineren Unternehmen eine Standardisierung von Prozessen genutzt wird.



---

Experte/Expertin 1 gab im Interview an, dass grundsätzlich alle Mitarbeitenden im Unternehmen für das Thema Nachhaltigkeit sensibilisiert werden. Die Projektleitung bei Digitalisierungsprojekten ist immer eine Schnittstellenfunktion. Weitere Rollen in den Digitalisierungsprojekten sind bspw. die Schichtleitung, Werksleitung, Produktionsleitung, qualifizierte Technikerinnen und Techniker und der Funktionsbereich der IT. Nachhaltigkeit verändert die Art wie gearbeitet wird, so Experte/Expertin 1. Daher ist es wichtig, dass die Projektleitung die Relevanz des Themas für alle Teilnehmenden des Projekts transparent kommuniziert (vgl. Anhang 8, SY5).

Die Experten/Expertinnen wurden ebenfalls zu den vorgeschlagenen Managementwerkzeugen und Modellen, welche für die Arbeitsschritte des SIA-DT Prozessmodells empfohlen sind, befragt. Experte/Expertin 2 gibt an, dass der Einsatz von Nachhaltigkeitsreifegradmodellen in der ersten Phase des SIA-DT Prozesses, der strategischen Nachhaltigkeitsreifegrad-Bewertung, gut geeignet ist, um Nachhaltigkeitsstehel im Unternehmen zu identifizieren. Der Begriff der Reifegradmodelle ist offen genug, um alternative strategische Analysen und Modelle in dieser Phase zu nutzen wie bspw. eine SWOT-Analyse (vgl. Anhang 9, I11).

Experte/Expertin 1 gibt zur ersten Phase an, dass Expertinnen und Experten im Unternehmen, welche die Digitalisierung verstehen, Optimierungspotentiale schnell identifizieren können. Reifegradbewertungen dahingegen sind schwerer durchzuführen. Außerdem muss definiert werden, gegen welche Zielwerte der Vergleich durchgeführt wird. Experte/Expertin 1 beschreibt, dass mit Erfahrung und Verständnis Optimierungspotenziale einfacher identifiziert und genutzt werden als mit Reifegradanalysen (vgl. Anhang 8, I11). Auch Experte/Expertin 3 schätzt die Reifegradmodelle als gute Methode für eine Strategieintegration ein (vgl. Anhang 10, I11).

Für den dritten Arbeitsschritt des SIA-DT Prozessmodells, der Nachhaltigkeits- und Risikoanalyse der Technologieoptionen, sowie dem neunten Schritt, der Analyse des technischen Konzepts auf Nachhaltigkeit und Risiken bezüglich der Umsetzung in der Produktion, schätzt Experte/Expertin 2 die Life Cycle Analyse als eher schwierig einzusetzen ein, denn für die LCA ist eine umfangreiche Datengrundlage notwendig. In frühen Phasen der Umsetzung sind diese Daten möglicherweise noch nicht verfügbar, so Experte/Expertin 2 (vgl. Anhang 9, I12, I13).

In der letzten Phase des SIA-DT Prozesses wird die Technologie in die operative Umgebung überführt und die Daten, die durch die Technologie generiert werden, kontinuierlich in das bestehende Datenökosystem eingespeist. Im Unternehmen in dem Experte/Expertin 1 tätig ist, ist dies für die energiebezogenen Nachhaltigkeitsdaten bereits der Fall. Die Verbräuche von Anlagen und ganzen Standorten werden automatisiert in die IT-Systeme übertragen und können vom Management eingesehen werden. Energiebezogene Kennzahlen sind im Supply Chain Management sogar bonusrelevant, so Experte/Expertin 1 (vgl. Anhang 8, I14).

Experte/Expertin 3 gibt an, dass bei Digitalisierungsprojekten im Unternehmen in dem Experten/Expertin 3 tätig ist, aktuell noch keine standardmäßige Anwendung von den oben genannten Methoden erfolgt (vgl. Anhang 10, SY7). Eine systematische Vorgehensweise in Anlehnung an das CRISP-DM Prozessmodell wird aber genutzt, so Experte/Expertin 3 (vgl. Anhang 10, I1).

---

### 5.3.8 Integration und Synergieeffekte zwischen Technologien

Alle Interview-Teilnehmenden, die während der Interviews befragt wurden (vgl. Tabelle 13) welche Technologien (KI, IoT, Robotics, Big Data, Cloud Computing, AR, VR und 3D-Printing) die insgesamt höchste Bedeutung für die Erreichung der Nachhaltigkeitsziele hat (vgl. Anhang 7, S3.1), antworteten auf die Frage ähnlich.

Experte/Expertin 4, mit großer Expertise in der Maschinendatenverwertung, beschreibt, dass die Technologien nicht als Alternativen betrachtet werden können (vgl. Anhang 11, S3.1). Genauso sieht es Experte/Expertin 1. Damit einzelne Technologien einen Mehrwert generieren können, müssen Sie mit anderen Technologien verknüpft werden. Eine Technologie einzeln zu implementieren ist oftmals nicht sinnvoll. Experte/Expertin 1 beschreibt das alle oben genannten Technologien einen großen Beitrag zur Nachhaltigkeitstransformation der Industrie leisten (vgl. Anhang 8, S2, S3.1). Experte/Expertin 1 beschreibt am Beispiel des Digital Backbone, das die Datenplattform gerade deshalb so wichtig ist, da diese die Technologien IoT, Edge Computing, Cloud Computing, Big Data und weitere Technologien vereint und so einen großen Mehrwert für das Unternehmen erbringt (vgl. Anhang 8, S2). Auch Experte/Expertin 3 weist darauf hin, dass die Technologien Ihren Mehrwert nicht entfalten, wenn diese einzeln implementiert werden. Die gemeinsame Nutzung und die Vielfalt der Technologielandschaft in den Unternehmen bringt den Wert, so Experte/Expertin 3. Die Heterogenität in den Produktionsprozessen erfordert ebenso differenzierte Technologieoptionen (vgl. Anhang 10, S3.1).

Während KI die Algorithmik bildet, werden andere Technologien für die technische Umsetzung der Modelle genutzt. Experte/Expertin 4 beschreibt, dass das Wichtigste bei komplexen Themen wie der Digitalisierung und der Nachhaltigkeitstransformation ist, dass datengetrieben gearbeitet werden muss. Zuerst werden dafür die Modelle aufgebaut und anschließend die Infrastruktur mit der entsprechenden Rechenleistung für diese Algorithmik installiert. Erst wenn die Modelle aufgebaut und die benötigte Rechenleistung und die Technologien für die technische Umsetzung ausgewählt sind, werden fallspezifisch die hardwareseitigen Technologien bzw. die Technologie für die technische Umsetzung ausgewählt. Das können bspw. Edge Computer, Cloud Computer oder einfache Schnittstellen zum Manufacturing Execution Systemen (MES) sein. Experte/Expertin 4 weist darauf hin, dass alle Technologien in verschiedenen Ausbaustufen einer nachhaltigen und digitalen Industrie wichtig sind und der Einsatz der Technologien sich gegenseitig bedingt (vgl. Anhang 11, S3.1).

Dass die Technologien miteinander verknüpft werden müssen, um das volle Potenzial digitaler Technologien für die Verbesserung von Nachhaltigkeit zu erreichen, zeigt sich auch darin, dass alle Experten denen die Fragen S3.1-S3.4 gestellt wurden (vgl. Anhang 7; Tabelle 13), bereits in Frage S3.1, in der die Interview-Teilnehmenden zu der nach ihrer Meinung wichtigsten Technologie zur Erreichung von Nachhaltigkeitszielen befragt wurden, einheitlich darstellen, dass die Verknüpfung mehrerer Technologien den eigentlichen Mehrwert schafft. Demnach wurden die Unterfragen S3.2, S3.3 und S3.4 in den Interviews mit Experte/Expertin 1, Experte/Expertin 3 und Experte/Expertin 4 übersprungen (vgl. Anhang 8; Anhang 10; Anhang 11; jeweils S3.1). Experte/Experte 3 beschreibt, dass der Weg bis zur vollständigen Verknüpfung der Technologien jedoch noch einige Schritte erfordert. Vorrangig ist die Verknüpfung der Schnittstellen der verschiedenen Technologien, da so eine leistungsfähige Datenaufnahme erreicht wird (vgl. Anhang 10, S3.1)

---

Die Synergien zwischen den Technologien sind ein wichtiger Aspekt bei der Integration der Technologien. Experte/Expertin 1 schätzt die Einführung der IoT-Technologie in Zusammenhang mit Edge Computing und Big Data aktuell am wichtigsten ein, da diese eine breite Datengrundlage für die Optimierung und Verbesserung von Prozessen im Unternehmen bieten. Auch Robotik und KI schätzt Experte/Expertin 1 als zukünftig wichtige Technologien ein (vgl. Anhang 8, S3.1). Es ist zu erkennen, dass es trotz der anzustrebenden Integration und Verzahnung der Technologien einen Bedarf für ein systematisches Vorgehen bei der Auswahl und Implementierung einzelner besonders wichtiger Vorreiter-Technologien gibt. Auch Experte/Expertin 3 schätzt die Produktionsdaten als besonders wichtig ein. Experte/Expertin 3 gibt an, dass langfristig die Echtzeit-Datenanalyse durch Edge und Cloud Computing im Zusammenspiel mit Künstlicher Intelligenz die größten positiven Effekte auf die Leistung und Nachhaltigkeit im Unternehmen erreichen werden. Mit diesen Technologien wird insbesondere die Planbarkeit und Steuerbarkeit der Prozesse stark verbessert. Als Beispiel gibt Experte/Expertin 3 die intelligente Steuerung von Medienströmen und das intelligente Abschalten von Maschinen und anderen Verbrauchern in der Fertigung an. Hardwareseitig schätzt Experte/Expertin 3 eine moderne Infrastruktur und geeignete Sensorik als besonders wichtig ein, während softwareseitig insbesondere die KI-Algorithmen, sowie die Datenbanken und -systeme wichtig sind. Experte/Expertin 3 beschreibt, dass die Aufnahme der Daten, die Speicherung und die anschließende Nutzung der Daten für die intelligente Steuerung der Operational Technology (OT, deutsch: Fertigungstechnologie) am wichtigsten sind (vgl. Anhang 10, S3.1).

Das SIA-DT Prozessmodell konzentriert sich auf die Auswahl, Integration und Anbindung einer digitalen Technologie. Die Entscheidungs- und Auswahlsschritte, sowie die zugrunde liegenden Analysen können jedoch um Auswertungen zu Synergien mit anderen Technologien erweitert werden. In der Phase der technischen Konzeptionierung sowie der Phase des Roll-outs in der Produktion werden Synergien erzielt, da die Technologie in die bestehende Infrastruktur und die bestehenden IT-Systeme angeschlossen wird.

---

## 6 Fazit

---

Digitalisierung und Nachhaltigkeit sind eng miteinander verknüpft. Nur durch die Verknüpfung beider Themenfelder, wird eine Nachhaltigkeitstransformation erreicht. Die Arbeit identifiziert, dass die stetig wachsende Zahl an umfassenden Rahmenwerken für Nachhaltigkeit in der Industrie auch die Digitalisierung vorantreibt. Die Ergebnisse der Interviews zeigen, dass insbesondere die steigenden gesetzlichen Anforderungen ein starker Treiber für die produzierende Industrie sind, digitale Technologien einzusetzen, um den Anforderungen der Regularien gerecht zu werden. Die Literaturrecherche und Experten/Expertinnen-Interviews bestätigen, dass Nachhaltigkeit auch bei der Digitalisierung als Leitmotiv eingebunden werden muss, um die beste Synergie zwischen Digitalisierungs- und Nachhaltigkeitstransformation zu erreichen.

Digitale Technologien sind in der produzierenden Industrie allerdings mehr als nur ein Mittel zum Zweck. Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass digitale Technologien Schlüssel und kritischer Faktor für den langfristigen Erfolg bei der Nachhaltigkeitstransformation von Unternehmen sind. Digitale Technologien sind gleichermaßen auch für die ökonomische Nachhaltigkeit bedeutend, denn sie treiben die Effizienz und die Qualität von Prozessen und Produkten voran und reduzieren die Kosten. Zudem bestätigen die Ergebnisse, dass im Zuge der Nachhaltigkeitstransformation ein struktureller und technologischer Wandel in Unternehmen notwendig ist, der auch die Verknüpfung von Nachhaltigkeit und Digitalisierungsprozessen betrifft. Die Verbindung von Digitalisierung und Nachhaltigkeit ist eine Gesamtaufgabe für das Unternehmen, bei der eine interdisziplinäre Zusammenarbeit erforderlich ist. Die Aussagen der Experten/Expertinnen zeigen, dass sowohl bei der digitalen Transformation als auch bei der Erreichung einer nachhaltigen Industrie systematisch und datengetrieben gearbeitet werden muss. Auch die Ergebnisse des Vergleichs von Industrie 4.0 und Industrie 5.0 bestätigen die zunehmende Verknüpfung von Digitalisierung und Nachhaltigkeit. Die Digitalisierungskonzepte für die Produktion entwickeln sich zu nachhaltigkeitsintegrierten Digitalisierungskonzepten.

Die Ausführungen der Arbeit zeigen, dass UMS und die in den UMS enthaltenen Prozesse erreichen, dass die Transformation systematisch und nachvollziehbar geschieht. Das SIA-DT Prozessmodell, welches diese Arbeit einführt, systematisiert ein nachhaltigkeitsgetriebenes Projektmanagement von Digitalisierungsprojekten, bei denen digitale Technologien im Produktionsumfeld implementiert werden, um Nachhaltigkeitsziele zu erreichen und zu verbessern. Das SIA-DT Prozessmodell besitzt Schnittstellen zu anderen Prozessen des Umwelt- und Digitalisierungsmanagements. Wird der SIA-DT Prozess in ein nach der Norm DIN EN ISO 14001 zertifiziertes Managementsystem aufgenommen, profitieren Unternehmen von diesen Wechselwirkungen.

Die Einbeziehung der Mitarbeitenden, die Unterstützung durch das Top Management und die Entwicklung von technischen umweltbezogenen Fähigkeiten im Unternehmen werden als wichtige Erfolgsfaktoren für UMS identifiziert und sind aus diesem Grund im Design des SIA-DT Prozessmodells berücksichtigt. Insbesondere die Schnittstelle zum Top Management und die Einbeziehung aller Projektbeteiligten an Entscheidungsgates sind im SIA-DT Prozessmodell gegeben. Auch die Bedeutung von Nachhaltigkeitsrahmenwerken, -zielsystemen und -zielen (strategisch/operativ) sind in der Arbeit beschrieben. Die Arbeit zeigt, dass die Beziehung zwischen den Rahmenwerken vielseitig sind und das den einzelnen Standards verschiedene Aufgaben zukommen. Die Arbeit beschreibt verschiedene Methoden, mit denen der Einfluss von

---

Prozessoptimierungen und neuen Technologien auf die Nachhaltigkeitsziele und -kennzahlen ermittelt werden können. Die Ergebnisse der Literaturrecherche zeigen, dass insbesondere KMUs Managementwerkzeuge einsetzen, um limitierte Ressourcen, im Sinne der Nachhaltigkeitstransformation, besser zu nutzen.

Die Arbeit identifiziert die wichtigsten Stellhebel und Bereiche, um Nachhaltigkeit in produzierenden Unternehmen zu erreichen und belegt mittels Aussagen von Experten/Expertinnen, dass digitale Technologien in diesen Bereichen bereits zum Einsatz kommen. Vier große Stellhebel für die Erreichung einer nachhaltigen und leistungsfähigen Produktion werden identifiziert: Produktionsdaten, Robotik, verbesserte Assistenzsysteme sowie AR und VR.

Es werden zehn Design-Empfehlungen der Literatur zur Integration von Nachhaltigkeit und Nachhaltigkeitszielen identifiziert und die Entwicklung des SIA-DT Prozessmodells auf diesen gestützt. Der Entwurf des SIA-DT Prozessmodells wird mittels Experten/Expertinnen-Interviews evaluiert. Aus dem Vergleich verschiedener Modellierungskonventionen geht hervor, dass BPMN 2.0 am geeignetsten für die Modellierung des SIA-DT Prozessmodells ist. Das BPMN 2.0 Prozessmodell verbindet die Struktur des Stage-Gate Modells mit den Arbeitsschritten des DMME Prozessmodells. Diese werden als Grundlagen des SIA-DT Prozessmodells verwendet. Die Verknüpfung und Erweiterung der bestehenden Modelle ermöglichen eine bessere Anwendbarkeit des Prozessmodells im Management.

Zu den Arbeitsschritten des DMME Prozesses werden nachhaltigkeitsintegrierende Arbeitsschritte ergänzt und Entscheidungspunkte entlang des Prozessablaufs gesetzt, die eine konsequente Ausrichtung und Steuerung des Digitalisierungsprojektmanagements an Nachhaltigkeitszielen sicherstellen. Die Schritte werden in Phasen zusammengefasst.

Die Arbeit erreicht die gesetzte Zielstellung, indem Forschungsergebnisse zu Nachhaltigkeits-, Digitalisierungsframeworks und Nachhaltigkeitszielsystemen untersucht werden und ein Prozessmodell auf Grundlage der Erkenntnisse entwickelt und mittels Experten/Expertinnen-Interviews evaluiert wird. Die wichtigsten Stellhebel produzierender Unternehmen, um die Nachhaltigkeit durch den Einsatz digitaler Technologien zu erhöhen, werden identifiziert und beschrieben. Das Prozessmodell des SIA-DT Prozesses zeigt, wie die Nutzung von digitalen Technologien systematisch zur Erreichung oder Verbesserung von Nachhaltigkeitszielen genutzt werden kann. Das SIA-DT Prozessmodell ist ein Modell für Managementprozesse des Digitalisierungsmanagements in produzierenden Unternehmen, der die Nachhaltigkeitsstrategie, Nachhaltigkeitsbewertung von Technologieoptionen und des technischen Konzepts sowie die operative Implementierung und die Anbindung der Technologien an die bestehenden IT-Systeme umfasst.

Für die Forschung entsteht durch die Ergebnisse dieser Arbeit ein Mehrwert, da das SIA-DT Prozessmodell wissenschaftlich begründet nach der DSR-Methodologie erarbeitet wurde und fundierte theoretische Grundlagen und aktuelle Literatur mit Experten/Expertinnen-Aussagen verknüpft. Das SIA-DT Prozessmodell bildet das erste Prozessmodell für das Management von Digitalisierungsprojekten in produzierenden Unternehmen unter Integration der Nachhaltigkeitsstrategie, Nachhaltigkeitszielen und der Berücksichtigung des Datenmanagements für Nachhaltigkeitsdaten. Das SIA-DT Prozessmodell beantwortet die Frage, wie Nachhaltigkeit im Arbeitsfluss von Digitalisierungsprojekten systematisch integriert werden kann. Eine einfache Adaption des SIA-DT Prozessmodells durch Ausrichtung an gängigen internationalen Normen und Standards ist ein weiterer Vorteil. Betriebliche Managementsysteme sind eine Stütze zur

---

Umsetzung der Anforderungen aus Gesetzen und Regularien zum Nachhaltigkeitsmanagement in Unternehmen. Die Arbeit zeigt, wie die aus Nachhaltigkeitsrahmenwerken abgeleiteten Ziele auch auf der Prozessebene für die Steuerung genutzt werden können. Das SIA-DT Prozessmodell ergänzt bestehende Digitalisierungskonzepte dahingehend, dass ein Managementprozess modelliert wird, mit denen Unternehmen die digitalen Technologien nachhaltigkeitszielgetrieben auswählen und einführen können. Der SIA-DT Prozess berücksichtigt Nachhaltigkeitspotenziale bei der Auswahl von Technologien welche bspw. im Industrie 4.0 Konzept allein, nicht betrachtet werden. Dabei werden für die Schritte des SIA-DT Prozessmodells gängige Managementwerkzeuge für das Nachhaltigkeitsmanagement empfohlen.

Auch für die produzierende Industrie bietet die Anwendung des SIA-DT Prozessmodells einen Mehrwert. Das Vorgehen nach dem SIA-DT Prozess ist datengetrieben und umfasst die Analyse von ökologischen, sozialen und ökonomischen Daten. Die Erkenntnisse aus den Daten werden im SIA-DT Prozessmodell integriert, um Entscheidungen während des Digitalisierungsprojekts aus Sicht der drei Nachhaltigkeitsdimensionen zu stützen. Das SIA-DT Prozessmodell schafft eine Verknüpfung von Nachhaltigkeitsstandards und -zielen mit Managementprozessen für die Digitalisierung und unterstützt somit die Erreichung und Optimierung der Nachhaltigkeitsziele Shop Floor und auf der Unternehmensebene. Produktionsdaten, Robotik, verbesserte Assistenzsysteme sowie AR und VR wurden als die vier wichtigsten Stellhebel zur Erreichung von Nachhaltigkeit identifiziert. Insbesondere für diese digitalen Technologien kann der SIA-DT Prozess angewendet werden, da im SIA-DT Prozessmodell der Fokus auf datengetriebenen und modellbasierten Technologien liegt. Die Empfehlung gängiger Managementwerkzeuge für einzelne Schritte des Prozessmodells gibt Unternehmen eine Anleitung, in welcher Projektphase welche Modelle am geeignetsten sind. Das SIA-DT Prozessmodell hilft Unternehmen Budgets aus Sicht des Nachhaltigkeitsmanagements begründet in Digitalisierungsinitiativen fließen zu lassen. Dem Digitalisierungsmanagement hilft das SIA-DT Prozessmodell, da es konkretisiert zu welchem Zeitpunkt in Digitalisierungsprojekten Nachhaltigkeitsziele bei Entscheidungen und Analysen einbezogen werden müssen und welche Elemente des Nachhaltigkeitsmanagements bei Digitalisierungsprojekten wichtig sind. Die Verknüpfung von digitalen Technologien in der Fertigung mit dem Nachhaltigkeitsmanagement trägt außerdem dazu bei, dass Unternehmen durch die datengetriebenen Technologien, welche selbst Daten produzieren, eine verbesserte Datengrundlage schaffen. Diese Grundlage können Unternehmen nutzen um Daten wie CO<sub>2</sub>-Emissionen, Energie- sowie Materialverbräuche und andere nachhaltigkeitsrelevanten Kennzahlen zu erheben.

Diese Arbeit diskutiert das SIA-DT Prozessmodell und identifiziert dabei Limitationen und Ansatzpunkte für weitere Forschungen. Da für das SIA-DT Prozessmodell aufgrund seiner Neuheit noch kein breites Verständnis vorhanden ist, kann das SIA-DT Prozessmodell bei der weiteren Evaluation nicht durch Befragungen bewertet werden, sondern sollte als Use Case implementiert werden. Die Erfahrungen des Use Case können dann innerhalb einer größeren Anzahl von Experten/Expertinnen-Interviews erneut evaluiert werden. Die Diskussion der Einsatzmöglichkeiten des SIA-DT Prozessmodells zeigt, dass der Einsatz von umfassenden Standards wie dem SIA-DT Prozessmodell in kleinen, schnell wachsenden und agilen Unternehmen schwieriger sein könnte. Bei der weiteren Evaluation des SIA-DT Prozessmodells muss dies überprüft werden. Soziale und ökologische Projekte besitzen teils sehr unterschiedliche Anforderungen. Die Eignung des SIA-DT Prozessmodells für ökologische und soziale Zielerreichung sollte daher genauer untersucht werden. Bei der Anwendung des SIA-DT Prozessmodells muss darauf geachtet werden, dass

---

Unternehmen, in denen das Modell umgesetzt wird, ein nachweislich (bspw. durch Zertifizierung nach der Norm DIN EN ISO 14001) systematisches Management von Nachhaltigkeit besitzen.

In den Experten/Expertinnen-Interviews zeigt sich ein unterschiedliches Verständnis gegenüber dem DMME Prozessmodell. Das DMME Prozessmodell wird von einigen Experten/Expertinnen als nachhaltigkeitsintegriert beschrieben, wenn dieses entsprechend verstanden und umgesetzt wird. Andere Experten/Expertinnen beschreiben, dass das DMME bzw. CRISP-DM Prozessmodell nicht als nachhaltigkeitsintegriertes Modell angewendet wird und bei Digitalisierungsprojekten gar keine oder nur teilweise vordefinierte Prozesse durchlaufen werden. Zukünftige Forschungen müssen untersuchen, wie das SIA-DT Prozessmodell das Verständnis und die Akzeptanz einer durchgängigen Nachhaltigkeitszielorientierung bei Digitalisierungsprojekten verändert.

Eine Limitation des SIA-DT Prozessmodells ist die Beschränkung des Ansatzes auf datengetriebene Technologien. Ein Gegenstand für weitere Forschungen ist die Überprüfung der Anwendbarkeit des SIA-DT Prozessmodells für andere wichtige, jedoch nicht oder nur bedingt digitale Technologien wie den Carbon Capture and Storage/Usage Technologien (CCS/CCU). Ebenfalls muss untersucht werden, ob sich das SIA-DT Prozessmodell für die Anwendung in Projekten eignet, bei denen ein gemeinsamer Einsatz mehrerer Technologien erreicht werden soll, da die Ergebnisse der Evaluation zeigen, dass insbesondere die Integration von verschiedenen Technologien einen hohen Mehrwert bringt. In der Vorstellung von Methoden, die in den Schritten des SIA-DT Prozessmodells zur Anwendung kommen können, ist ersichtlich geworden, dass für einige Methoden bisher nur wenige wissenschaftliche Veröffentlichungen existieren. Eine bessere Adaption gängiger Methoden für die Bewertung des Einflusses und Nutzens von digitalen Technologien auf Kenngrößen von Produktionsprozessen und Nachhaltigkeitszielen ist eine weitere Anregung für zukünftige Forschungen auf dem Gebiet der Integration von Digitalisierung und Nachhaltigkeit.

Auch wenn einige Fragen durch weitere Forschungsarbeiten beantwortet werden müssen, wurde mit dem SIA-DT Prozessmodell, die Forderung der Forschung nach einer Integration von Nachhaltigkeit in das Digitalisierungsprojektmanagement erfüllt. Außerdem wurde das erste Prozessmodell für Digitalisierungsprojekte in produzierenden Unternehmen zur nachhaltigkeitsgetriebenen Nutzung von digitalen Technologien entwickelt, das bekannte Standards aus dem Digitalisierungs- und Nachhaltigkeitsmanagement verknüpft und erweitert. Die Ergebnisse der Experten/Expertinnen-Interviews zeigen deutlich, dass alle Interview-Teilnehmenden den Entwurf des SIA-DT Prozesses insgesamt für sinnvoll halten und davon ausgehen, dass das Prozessmodell einen Mehrwert für produzierende Unternehmen bieten kann. Damit trägt das SIA-DT Prozessmodell zu einer weiteren Verknüpfung von Nachhaltigkeit und Digitalisierung und einer digitalen und nachhaltigen Zukunft der produzierenden Industrie bei.

---

# Literaturverzeichnis

- Abele, Eberhard (2011): Zukunft der Produktion. Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München, Hanser. 2011.
- ACCA (2018): Tenets of good corporate reporting. Online verfügbar unter <https://www.accaglobal.com/gb/en/professional-insights/global-profession/Tenets-of-good-corporate-reporting.html> (abgerufen am 26.10.2023).
- Afum, Ebenezer, et al. (2021): Sustainability excellence. The interactions of lean production, internal green practices and green product innovation. *International Journal of Lean Six Sigma* 12 (6), S. 1089–1114. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-07-2020-0109>.
- Ahsen, Anette von; Petruschke, Lars; Frick, Nicholas (2022): Sustainability Failure Mode and Effects Analysis. A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production* 363, S. 132413. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132413>.
- Akbari, Mohammadreza; Hopkins, John L. (2022): Digital technologies as enablers of supply chain sustainability in an emerging economy. *Operations Management Research* 15 (3-4), S. 689–710. <https://doi.org/10.1007/s12063-021-00226-8>.
- Al-Aomar, Raid (Hg.) (2019): Sustainability Function Deployment. A system-level design-for-sustainability, The 13th Annual IEEE International Systems Conference, Hyatt Grand Cypress Hotel, Orlando, Florida, USA. Piscataway, NJ, USA, IEEE.
- Al-Bahi, Ali M; Abd-Elwahed, Mohamed S; Soliman, Abdelfattah Y. (2021): Implementation of Sustainability Indicators in Engineering Education Using a Combined Balanced Scorecard and Quality Function Deployment Approaches. *Sustainability* 13 (13), 7083. <https://doi.org/10.3390/su13137083>.
- Albrecht, Martina, et al. (2016): Kompetenzbasiertes Projektmanagement (PM3). Handbuch für die Projektarbeit, Qualifizierung und Zertifizierung auf Basis der IPMA Competence Baseline Version 3.0. 8. Aufl. Nürnberg. 2016.
- Alriksson, Stina; Oberg, Tomas (2008): Conjoint analysis for environmental evaluation. A review of methods and applications. *Environmental science and pollution research international* 15 (3), S. 244–257. <https://doi.org/10.1065/espr2008.02.479>.
- Anderl, Reiner (2020): Virtuelle Produktentwicklung A. CAD-Systeme und CAx-Prozessketten. Skript zur Vorlesung im WS 2020/21 Darmstadt, 2020.
- Arey, Daniel; Le, Chi H; Gao, James (2021): Lean industry 4.0. A digital value stream approach to process improvement. *Procedia Manufacturing* 54, S. 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.07.004>.
- Asian Development Bank (2022): Sustainable Development Goals. Key Indicators Database. Online verfügbar unter <https://kidb.adb.org/themes/sustainable-development-goals> (abgerufen am 26.10.2023).
- ASQ (2023): Continuous Improvement Model. Continual Improvement Tools. Online verfügbar unter <https://asq.org/quality-resources/continuous-improvement> (abgerufen am 26.10.2023).
- Ayabaca, César; Vila, Carlos (2020): An Approach to Sustainable Metrics Definition and Evaluation for Green Manufacturing in Material Removal Processes. *Materials* 13 (2), S. 373. <https://doi.org/10.3390/ma13020373>.
- Aziz, E. E. (2015): Project closing. The small process group with big impact. Project Management Institute. Online verfügbar unter <https://www.pmi.org/learning/library/importance-of-closing-process-group-9949> (abgerufen am 26.10.2023).



- 
- Bai, Chunguang, et al. (2020): Industry 4.0 technologies assessment. A sustainability perspective. *International Journal of Production Economics* 229, S. 107776.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107776>.
- Barletta, Ilaria, et al. (2021): Organisational sustainability readiness. A model and assessment tool for manufacturing companies. *Journal of Cleaner Production* 284, S. 125404.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125404>.
- Bastos, Alan, et al. (2021): Industry 4.0 Readiness Assessment Method Based on RAMI 4.0 Standards. *IEEE Access* 9, S. 119778–119799. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3105456>.
- Bendig, David, et al. (2021): Industrie 5.0. Die Europäische Kommission auf den Spuren der nächsten industriellen Revolution? *Industrie 4.0 Management* 2021 (6), S. 20–22.  
[https://doi.org/10.30844/I40M\\_21-6\\_S20-22](https://doi.org/10.30844/I40M_21-6_S20-22).
- Beuth Verlag (2023): DIN EN ISO 14001:2015-11. Online verfügbar unter <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-14001/236721041> (abgerufen am 26.10.2023).
- Blasco, José L; King, Adrian; Jayaram, Santhosh (2018): How to report on the SDGs. What good looks like and why it matters. KPMG International. Online verfügbar unter <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/xx/pdf/2018/02/how-to-report-on-sdgs.pdf> (abgerufen am 26.10.2023).
- Bokrantz, Jon; Subramaniyan, Mukund; Skoogh, Anders (2023): Realising the promises of artificial intelligence in manufacturing by enhancing CRISP-DM. *Production Planning & Control*, S. 1–21.  
<https://doi.org/10.1080/09537287.2023.2234882>.
- Börger, Egon (2012): Approaches to modeling business processes. A critical analysis of BPMN, workflow patterns and YAWL. *Software & Systems Modeling* 11 (3), S. 305–318.  
<https://doi.org/10.1007/s10270-011-0214-z>.
- BPMN Offensive Berlin (2015): BPMN Poster. Online verfügbar unter <http://www.bpmb.de/index.php/BPMNPoster> (abgerufen am 26.10.2023).
- Breque, Maija; Nul, Lars de; Petridis, Athanasios (2021): Industry 5.0. Towards a sustainable, humancentric and resilient European industry. European Commission. Brüssel.  
<https://doi.org/10.2777/308407>.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2023): Klimaschutz. Online verfügbar unter <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Textsammlungen/Industrie/klimaschutz.html> (abgerufen am 26.10.2023).
- Bundesumweltministerium (2021): Planetare Belastbarkeitsgrenzen. Online verfügbar unter <https://www.bmuv.de/themen/nachhaltigkeit-digitalisierung/nachhaltigkeit/integriertes-umweltprogramm-2030/planetare-belastbarkeitsgrenzen> (abgerufen am 26.10.2023).
- Bundesumweltministerium (2022): Was ist die EU-Taxonomie?- BMUV - FAQ. Online verfügbar unter <https://www.bmuv.de/faq/was-ist-die-taxonomie> (abgerufen am 26.10.2023).
- Carolis, Anna de, et al. (2017): A Maturity Model for Assessing the Digital Readiness of Manufacturing Companies. In: H. Lödding; R. Riedel; K.-D. Thoben et al. (Hg.). *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.* Cham, Springer. 2017, S. 13–20.
- Chapman, Pete, et al. (2000): CRISP-DM 1.0. Step-by-step data mining guide.
- Chelliah, Pethuru R; Nagarajan, G; Minu, R. I. (Hg.) (2022): *Applied edge AI. Concepts, platforms, and industry use cases.* Boca Raton u. a., CRC Press Taylor & Francis Group.
- Chiarini, Andrea (2019): Factors for succeeding in ISO 14001 implementation in Italian construction industry. *Business Strategy and the Environment* 28 (5), S. 794–803.  
<https://doi.org/10.1002/bse.2281>.

- 
- Clancy, Rose; O'Sullivan, Dominic; Bruton, Ken (2023): Data-driven quality improvement approach to reducing waste in manufacturing. *The TQM Journal* 35 (1), S. 51–72. <https://doi.org/10.1108/TQM-02-2021-0061>.
- Conijn, J. G., et al. (2018): Can our global food system meet food demand within planetary boundaries? *Agriculture, Ecosystems & Environment* 251, S. 244–256. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.001>.
- Contini, Giuditta; Peruzzini, Margherita (2022): Sustainability and Industry 4.0. Definition of a Set of Key Performance Indicators for Manufacturing Companies. *Sustainability* 14 (17), S. 11004. <https://doi.org/10.3390/su141711004>.
- Cooper, Robert G. (1990): Stage-gate systems. A new tool for managing new products. *Business Horizons* 33 (3), S. 44–54. [https://doi.org/10.1016/0007-6813\(90\)90040-I](https://doi.org/10.1016/0007-6813(90)90040-I).
- Cooper, Robert G. (2008): Perspective: The Stage-Gate® Idea-to-Launch Process—Update, What's New, and NexGen Systems\*. *Journal of Product Innovation Management* 25 (3), S. 213–232. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5885.2008.00296.x>.
- Corradini, Flavio, et al. (2018): A Guidelines framework for understandable BPMN models. *Data & Knowledge Engineering* 113, S. 129–154. <https://doi.org/10.1016/j.datak.2017.11.003>.
- Desai, Anoop; Mital, Anil (2021): Sustainable product design and development. Boca Raton, FL, CRC Press. 2021.
- DIN EN ISO 14001:2015: Umweltmanagementsysteme, 2015. Berlin, Beuth Verlag.
- DIN EN ISO 26000:2021-04: DIN EN ISO 26000:2021-04, 2021. Berlin, Beuth Verlag.
- DIN EN ISO 9000:2015: Qualitätsmanagementsysteme, 2015. Berlin, Beuth Verlag.
- DIN EN ISO 9001:2015: Qualitätsmanagementsysteme, 2015. Berlin, Beuth Verlag.
- Dorador, J. M; Young, R. I. M. (2000): Application of IDEF0, IDEF3 and UML methodologies in the creation of information models. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 13 (5), S. 430–445. <https://doi.org/10.1080/09511920050117928>.
- Edtmayr, Thomas; Sunk, Alexander; Sihm, Wilfried (2016): An Approach to Integrate Parameters and Indicators of Sustainability Management into Value Stream Mapping. *Procedia CIRP* 41, S. 289–294. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.037>.
- Elkington, John (1998): Accounting for the triple bottom line. *Measuring Business Excellence* 2 (3), S. 18–22. <https://doi.org/10.1108/eb025539>.
- Facchini, Francesco; Digiesi, Salvatore; Pinto, Luiz F. R. (2022): Implementation of I4.0 technologies in production systems. Opportunities and limits in the digital transformation. *Procedia Computer Science* 200, S. 1705–1714. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.371>.
- Fadly, Dalia (2020): Greening Industry in Vietnam. *Environmental Management Standards and Resource Efficiency in SMEs. Sustainability* 12 (18), S. 7455. <https://doi.org/10.3390/su12187455>.
- Faulkner, William; Badurdeen, Fazleena (2014): Sustainable Value Stream Mapping (Sus-VSM). Methodology to visualize and assess manufacturing sustainability performance. *Journal of Cleaner Production* 85, S. 8–18. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.042>.
- Feng, Shaw; Joung, Che (Hg.) (2010): Development Overview of Sustainable Manufacturing Metrics, International Conference on Life Cycle Engineering. Proceedings of the 17th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering 2010, Hefei, -1.
- Ferreira, Ailton S; Oliveira, Gabriel R. (2019): Business process modeling. A webibliominig perspective of architecture frameworks. *Independent Journal of Management & Production* 10 (3), S. 1159. <https://doi.org/10.14807/ijmp.v10i3.886>.
- Figge, Frank, et al. (2001): Sustainability Balanced Scorecard. Lüneburg, Centre for Sustainability Management. 2001.

- 
- Fraga-Lamas, P; Lopes, S. I; Fernández-Caramés, T. (2021): Green IoT and Edge AI as Key Technological Enablers for a Sustainable Digital Transition towards a Smart Circular Economy: An Industry 5.0 Use Case. Italian National Conference on Sensors. <https://doi.org/10.3390/S21175745>.
- Franz, Peter, et al. (2021): Die DIN ISO 26000. Leitfaden zur gesellschaftlichen Verantwortung von Organisationen Ein Überblick. Online verfügbar unter <https://www.bmas.de/DE/Service/Publikationen/Broschueren/a395-csr-din-26000.html> (abgerufen am 26.10.2023).
- Friedlingstein, Pierre; O’Sullivan, Michael; Jones, Matthew W. (2022): Global Carbon Budget 2022. *Earth System Science Data* 14 (11), S. 4811–4900. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>.
- Fuertes, Guillermo, et al. (2022): Opportunities of the Technological Trends Linked to Industry 4.0 for Achieve Sustainable Manufacturing Objectives. *Sustainability* 14 (18), S. 11118.
- García-Domínguez, A; Marcos, Mariano; Medina, I.: A comparison of BPMN 2.0 with other notations for manufacturing processes, S. 593–600. <https://doi.org/10.1063/1.4707613>.
- Garza-Reyes, Jose A., et al. (2018): A PDCA-based approach to Environmental Value Stream Mapping (E-VSM). *Journal of Cleaner Production* 180, S. 335–348. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.121>.
- Geiger, Matthias, et al. (2018): BPMN 2.0. The state of support and implementation. *Future Generation Computer Systems* 80, S. 250–262. <https://doi.org/10.1016/j.future.2017.01.006>.
- Gesetz über die unternehmerischen Sorgfaltspflichten in Lieferketten. In: *Bundesgesetzblatt Jahrgang 2021 Teil I Nr. 46*, S. 2959–2969.
- Gladwin, Thomas N; Kennelly, James J; Krause, Tara-Shelomith (1995): Shifting Paradigms for Sustainable Development. Implications for Management Theory and Research. *The Academy of Management Review* 20 (4).
- Godina, Radu, et al. (2020): Impact Assessment of Additive Manufacturing on Sustainable Business Models in Industry 4.0 Context. *Sustainability* 12 (17), S. 7066. <https://doi.org/10.3390/su12177066>.
- Gonzalez-Huerta, Javier; Boubaker, Anis; Mili, Hamed (2017): A Business Process Re-Engineering Approach to Transform BPMN Models to Software Artifacts 289, S. 170–184. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-59041-7\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-59041-7_10).
- Hartmann, Lukas, et al. (2018): Value stream method 4.0. Holistic method to analyse and design value streams in the digital age. *Procedia CIRP* 78, S. 249–254. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.309>.
- Hatayama, Hiroki (2022): The metals industry and the Sustainable Development Goals. The relationship explored based on SDG reporting. *Resources, Conservation and Recycling* 178, S. 106081. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106081>.
- Hein-Pensel, Franziska, et al. (2023): Maturity assessment for Industry 5.0. A review of existing maturity models. *Journal of Manufacturing Systems* 66, S. 200–210. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.12.009>.
- Hevner, Alan R., et al. (2004): Design Science in Information Systems Research. *MIS Quarterly*. Online verfügbar unter <https://www.jstor.org/stable/25148625> (abgerufen am 26.10.2023).
- Hochschule Neubrandenburg (2023): 7-M-Methode. Online verfügbar unter <https://www.hs-nb.de/fachbereich-soziale-arbeit-bildung-und-erziehung/forschungen-und-projekte/projekte/inklusionswerkstatt-mecklenburg-vorpommern-inklusive-teambuilding/7-m-methode/> (abgerufen am 26.10.2023).
- Hoffmann, Felix; Lang, Enno; Metternich, Joachim (2022): Development of a framework for the holistic generation of ML-based business models in manufacturing. *Procedia CIRP* 107, S. 209–214. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.04.035>.

- 
- Hsu, Chih-Hung; Chang, An-Yuan; Luo, Wei (2017): Identifying key performance factors for sustainability development of SMEs. Integrating QFD and fuzzy MADM methods. *Journal of Cleaner Production* 161, S. 629–645. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.063>.
- Huaccho Huatucu, Luisa; Ball, Peter D. (2019): The quest for achieving United Nations sustainability development goals (SDGs). *RAUSP Management Journal* 54 (3), S. 357–362.
- Huber, Florian (2021): Warum die Klimakrise alle Unternehmen komplett verändern wird. Online verfügbar unter [https://www.ey.com/de\\_de/decarbonization/die-klimakrise-als-5-industrielle-revolution](https://www.ey.com/de_de/decarbonization/die-klimakrise-als-5-industrielle-revolution) (abgerufen am 26.10.2023).
- Huber, Steffen, et al. (2019): DMME. Data mining methodology for engineering applications. *Procedia CIRP* 79, S. 403–408. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.106>.
- Hung, Hsing-Chun; Chen, Yuh-Wen (2023): Striving to Achieve United Nations Sustainable Development Goals of Taiwanese SMEs by Adopting Industry 4.0. *Sustainability* 15 (3), S. 2111. <https://doi.org/10.3390/su15032111>.
- Huss, Jürgen; Gadow, Friederike von (2012): *Sylvicultura oeconomica. Hauswirthliche Nachricht und Naturmäßige Anweisung zur Wilden Baum-Zucht. Mit einer Einführung von Jürgen Huss und Friederike von Gadow.* Leipzig. 2012.
- IBM (2021): IBM Documentation. Online verfügbar unter <https://www.ibm.com/docs/de/spss-modeler/saas?topic=dm-crisp-help-overview> (abgerufen am 26.10.2023).
- Ilg, Patrick (2019): Sustainability Balanced Scorecard. ICV. Online verfügbar unter [https://www.controlling-wiki.com/de/index.php/Sustainability\\_Balanced\\_Scorecard](https://www.controlling-wiki.com/de/index.php/Sustainability_Balanced_Scorecard) (abgerufen am 26.10.2023).
- International Energy Agency (2021): Key World Energy Statistics 2021. Statistics report.
- International Organization for Standardization (2018): Discovering ISO 26000. Guidance on social responsibility. Genf. Online verfügbar unter <https://www.iso.org/publication/PUB100258.html> (abgerufen am 26.10.2023).
- International Organization for Standardization (2023): ISO 14040:2006. Online verfügbar unter <https://www.iso.org/standard/37456.html> (abgerufen am 26.10.2023).
- International Organization for Standardization (2023): ISO 14044:2006. Online verfügbar unter <https://www.iso.org/standard/38498.html> (abgerufen am 26.10.2023).
- International Organization for Standardization (2023): ISO 26000:2010. Guidance on social responsibility. Online verfügbar unter <https://www.iso.org/standard/42546.html> (abgerufen am 26.10.2023).
- IWA 26:2017: IWA 26:2017, 2017. International Organization for Standardization.
- John, Lijo; Narayanamurthy, Gopalakrishnan (2015): Converging sustainability definitions. Industry independent dimensions. *World Journal of Science, Technology and Sustainable Development* 12 (3), S. 206–232. <https://doi.org/10.1108/WJSTSD-04-2015-0017>.
- Klos, Zbigniew S. (2022): *Towards a Sustainable Future. Life Cycle Management. Challenges and Prospects.* Cham, Springer International Publishing AG. 2022.
- Kopenhagen, Norbert; Gaß, Oliver; Müller, Benjamin (2012): *Design Science Research in Action. Anatomy of Success Critical Activities for Rigor and Relevance.* <https://doi.org/10.5445/IR/1000055012>.
- Korhonen, Jouni; Honkasalo, Antero; Seppälä, Jyri (2018): Circular Economy. The Concept and its Limitations. *Ecological Economics* 143, S. 37–46.
- Kusiak, Andrew; Nick Larson, T; Wang, Juite (1994): Reengineering of design and manufacturing processes. *Computers & Industrial Engineering* 26 (3), S. 521–536. [https://doi.org/10.1016/0360-8352\(94\)90048-5](https://doi.org/10.1016/0360-8352(94)90048-5).

- 
- Lehmann, Annekatriin, et al. (2013): Social aspects for sustainability assessment of technologies. Challenges for social life cycle assessment (SLCA). *The International Journal of Life Cycle Assessment* 18 (8), S. 1581–1592. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0594-0>.
- Li, Zhaojun; Wu, Gongyu (2018): A Text Mining based Reliability Analysis Method in Design Failure Mode and Effect Analysis. In: 2018 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM), S. 1–8.
- Lu, T., et al. (2012): Metrics-Based Sustainability Assessment of a Drilling Process. In: *Sustainable Manufacturing*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2012, S. 59–64.
- Lu, Yangguang; Liu, Zhiyong; Min, Qingfei (2021): A digital twin-enabled value stream mapping approach for production process reengineering in SMEs. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 34 (7-8), S. 764–782. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2021.1872099>.
- Marinova, Dora; Annandale, David; Phillimore, John (2007): *The international handbook on environmental technology management*. Cheltenham, UK u. a., Edward Elgar Pub. 2007.
- Mercator Research Institution on Global Commons and Climate Change (2023): *Verbleibendes Kohlenstoffbudget - Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC)*. Online verfügbar unter <https://www.mcc-berlin.net/en/research/co2-budget.html> (abgerufen am 26.10.2023).
- Metternich, J; Kreß, A. (2023): Digital-based production. Introduction and fields of application. *Production Engineering* 17 (2), S. 179–183. <https://doi.org/10.1007/s11740-023-01196-5>.
- Milosevic, Marko, et al. (2021): Sustainability of the Production Process by Applying Lean Manufacturing Through the PDCA Cycle. A Case Study in the Machinery Industry. In: S. Hloch; D. Klichová; F. Pude et al. (Hg.). *Advances in Manufacturing Engineering and Materials II. Proceedings of the International Conference on Manufacturing Engineering and Materials (ICMEM 2020), 21–25 June, 2021, Nový Smokovec, Slovakia*. Cham, Springer International Publishing; Imprint Springer. 2021, S. 199–211.
- Müller, Egon, et al. (2013): *Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben*. Berlin u. a., Springer. 2013.
- Muñoz-Villamizar, Andrés, et al. (2019): Green value stream mapping approach to improving productivity and environmental performance. *International Journal of Productivity and Performance Management* 68 (3), S. 608–625. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-06-2018-0216>.
- Ocicka, Barbara; Rogowski, Waldemar; Turek, Jolanta (2022): Industry 4.0 technologies as enablers of sustainability risk management. *Ekonomia i Prawo* 21 (4), S. 727–740. <https://doi.org/10.12775/EiP.2022.039>.
- Offermann, Philipp; Blom, Sören; Schönherr, Marten; Bub, Udo (Hg.) (2010): *Artifact Types in Information Systems Design Science. A Literature Review*.
- Oláh, Judit, et al. (2020): Impact of Industry 4.0 on Environmental Sustainability. *Sustainability* 12 (11), S. 4674. <https://doi.org/10.3390/su12114674>.
- Peças, Paulo, et al. (2023): Holistic Framework to Data-Driven Sustainability Assessment. *Sustainability* 15 (4), S. 3562. <https://doi.org/10.3390/su15043562>.
- Porter, Michael E; van der Linde, Claas (1995): *Green and Competitive: Ending the Stalemate. Sustainable Business Practice*. Online verfügbar unter <https://hbr.org/1995/09/green-and-competitive-ending-the-stalemate> (abgerufen am 17.05.2023).
- Portmann, Edy (2018): Wozu ist Soft Computing nützlich? Reflexionen anhand der Smart-City-Forschung. *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik* 55 (3), S. 496–509. <https://doi.org/10.1365/s40702-017-0383-5>.
- Rauch, Erwin, et al. (2015): Sustainability in Manufacturing through Distributed Manufacturing Systems (DMS). *Procedia CIRP* 29, S. 544–549. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.069>.

- 
- REFA (2023): PDCA-Zyklus. Online verfügbar unter <https://refa.de/service/refa-lexikon/pdca-zyklus> (abgerufen am 26.10.2023).
- Remer, Donald S; Nieto, Armando P. (1995): A compendium and comparison of 25 project evaluation techniques. *International Journal of Production Economics* 42 (1), S. 79–96. [https://doi.org/10.1016/0925-5273\(95\)00104-2](https://doi.org/10.1016/0925-5273(95)00104-2).
- Renda, A., et al. (2022): Industry 5.0. A transformative vision for Europe. Governing systemic transformations towards a sustainable industry. Luxemburg, Publications Office of the European Union. 2022.
- Roos Lindgreen, Erik; Salomone, Roberta; Reyes, Tatiana (2020): A Critical Review of Academic Approaches, Methods and Tools to Assess Circular Economy at the Micro Level. *Sustainability* 12 (12), S. 4973.
- Ruggerio, Carlos A. (2021): Sustainability and sustainable development. A review of principles and definitions. *The Science of the total environment* 786, S. 147481. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147481>.
- Rummel, Florian; Hüsigg, Stefan; Steinhauser, Stefanie (2022): Two archetypes of business model innovation processes for manufacturing firms in the context of digital transformation. *R&D Management* 52 (4), S. 685–703. <https://doi.org/10.1111/radm.12514>.
- Ryberg, Morten W., et al. (2018): How to bring absolute sustainability into decision-making. An industry case study using a Planetary Boundary-based methodology. *The Science of the total environment* 634, S. 1406–1416. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.075>.
- Sahu, Abhishek; Agrawal, Saurabh; Garg, Chandra P. (2023): Measuring circularity of a manufacturing organization by using sustainable balanced scorecard. *Environmental science and pollution research international*. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25896-8>.
- Sajadieh, Seyed M. M; Son, Yoo H; Noh, Sang D. (2022): A Conceptual Definition and Future Directions of Urban Smart Factory for Sustainable Manufacturing. *Sustainability* 14 (3), S. 1221. <https://doi.org/10.3390/su14031221>.
- Samoylova, Marina, et al. (2023): Digital technologies for sustainability in the European chemical industry. Arthur D. Little, CEFIC. Online verfügbar unter <https://www.adlittle.com/en/insights/report/digital-technologies-sustainability-european-chemical-industry> (abgerufen am 26.10.2023).
- Sandeep, Renangi, et al. (2022): Machine Learning Applications for Additive Manufacturing. State-of-the-Art and Future Perspectives. In: O. P. Jena; S. S. Patra; M. Panda et al. (Hg.). *Industrial transformation. Implementation and essential components and processes of digital systems*. Boca Raton, FL, CRC Press. 2022, S. 25–44.
- SAP Signavio (2023): Business Process Model and Notation. BPMN Einführung. Online verfügbar unter <https://www.signavio.com/de/bpmn-einfuehrung/> (abgerufen am 26.10.2023).
- SAP Signavio (2023): Prozessmodellierung mit BPMN 2.0. BPMN 2.0: Die einheitliche Sprache zur Modellierung von Geschäftsprozessen. Online verfügbar unter <https://www.signavio.com/de/prozessmodellierung-mit-bpmn-2-0/> (abgerufen am 05.06.2023).
- Sarikaya, Erkut, et al. (2021): Data Driven Production. Application Fields, Solutions and Benefits. Darmstadt. <https://doi.org/Erkut>.
- Schaltegger, Stefan; Lüdeke-Freund, Florian (2012): The 'Business Case for Sustainability' Concept. Lüneburg, Centre for Sustainability Management. 2012.
- Schaltegger, Stefan; Wagner, Marcus (2012): Managing the business case for sustainability. The integration of social, environmental and economic performance. *Int. J. Innovation and Sustainable Development*.
- Schmitt, Robert; Pfeifer, Tilo (2015): *Qualitätsmanagement. Strategien, Methoden, Techniken*. 5. Aufl. München u. a., Hanser. 2015.

- 
- Schock, Christoph (2019): CRISP-DM. Ein Ansatz zur Systematisierung von Digitalisierungsprojekten in Produktionsumfeldern. Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA. Bayreuth. Online verfügbar unter <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/b889bdbc-db5d-43a4-8a2f-b772dd4fcd1e/details> (abgerufen am 26.10.2023).
- Schreiber, Markus, et al. (2023): Tool management optimisation through traceability and tool wear prediction in the aviation industry. *Production Engineering* 17 (2), S. 185–195. <https://doi.org/10.1007/s11740-023-01194-7>.
- Sekretariat der Klimarahmenkonvention (Hg.) (1998): Das Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen. United Nations. Bonn.
- Seyfried, Stefan, et al. (2023): Klimaneutralität und Digitalisierung. Ein reifegradbasierter Ansatz zur Identifikation von Stellhebeln in der Produktion. *Industrie 4.0 Management* (2), S. 51–55.
- Sharma, Mahak, et al. (2022): Moving Towards Industry 5.0 in the Pharmaceutical Manufacturing Sector. Challenges and Solutions for Germany. *IEEE Transactions on Engineering Management*, S. 1–18. <https://doi.org/10.1109/TEM.2022.3143466>.
- Silva, Rui M. R.: Sustainability 4.0. Assessing the triple bottom line in a smart manufacturing context - Extended Abstract.
- Singh, Sujit, et al. (2018): Fuzzy-based sustainability evaluation method for manufacturing SMEs using balanced scorecard framework. *Journal of Intelligent Manufacturing* 29 (1), S. 1–18. <https://doi.org/10.1007/s10845-015-1081-1>.
- Siwiec, Dominika; Pacana, Andrzej; Gazda, Andrzej (2023): A New QFD-CE Method for Considering the Concept of Sustainable Development and Circular Economy. *Energies* 16 (5), S. 2474. <https://doi.org/10.3390/en16052474>.
- SixSigma Europe (2023): KVP. Kontinuierlicher Verbesserungsprozess. Online verfügbar unter <http://www.six-sigma-europe.com/kvp-kontinuierlicher-verbesserungsprozess-2> (abgerufen am 26.10.2023).
- Söllner, Fritz (2021): Methodologie. Ein Überblick. In: *Die Geschichte des ökonomischen Denkens*. Springer Gabler, Berlin, Heidelberg. 2021, S. 13–32.
- St. Galler Business School (2023): 2.2.5 Methode zur Prozessverbesserung durch den PDCA-Zyklus. Online verfügbar unter <https://sgbs.ch/publication/lean-management-lean-sales-process/2-2-5-methode-zur-prozessverbesserung-durch-den-pdca-zyklus> (abgerufen am 26.10.2023).
- Statista (2023): Anteil am Stromverbrauch nach Sektoren in Deutschland 2021. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/236757/umfrage/stromverbrauch-nach-sektoren-in-deutschland/> (abgerufen am 26.10.2023).
- Steffen, Will, et al. (2015): Sustainability. Planetary boundaries. guiding human development on a changing planet. *Science* 347 (6223), S. 1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>.
- Stockholm Resilience Center (2023): Planetary boundaries. Online verfügbar unter <https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html> (abgerufen am 26.10.2023).
- Su, Daizhong (2020): Sustainable Product Development. Tools, Methods and Examples. Cham, Springer International Publishing AG. 2020.
- Su, Hung-Chung; Dhanorkar, Suvrat; Linderman, Kevin (2015): A competitive advantage from the implementation timing of ISO management standards. *Journal of Operations Management* 37 (1), S. 31–44. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2015.03.004>.
- The Guardian (2023): Carbon countdown clock: how much of the world's carbon budget have we spent? Online verfügbar unter <https://www.theguardian.com/environment/datablog/2017/jan/19/carbon-countdown-clock-how-much-of-the-worlds-carbon-budget-have-we-spent> (abgerufen am 26.10.2023).

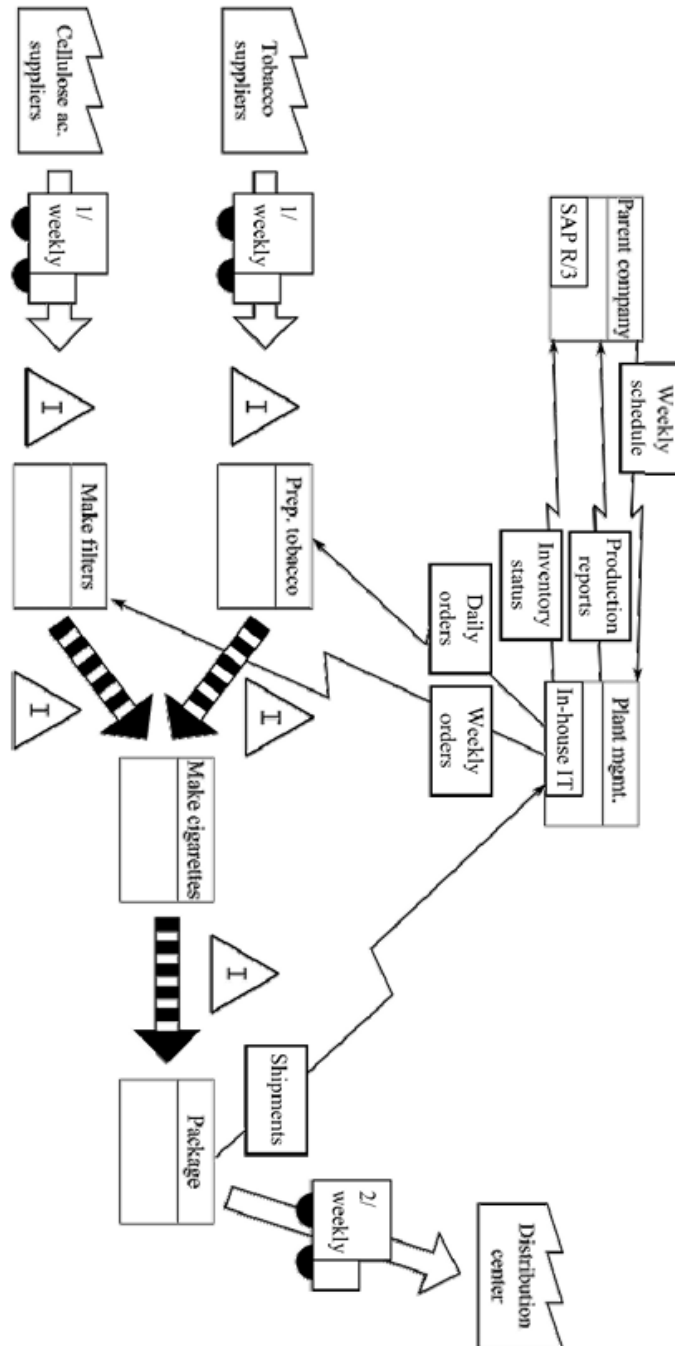
- 
- Toth-Peter, Agnes, et al. (2023): Industry 4.0 as an enabler in transitioning to circular business models. A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production* 393, S. 136284. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136284>.
- Trebuna, P; Pekarcikova, M; Edl, M. (2019): Digital Value Stream Mapping Using the Tecnomatix Plant Simulation Software. *International Journal of Simulation Modelling* 18 (1), S. 19–32. [https://doi.org/10.2507/IJSIMM18\(1\)455](https://doi.org/10.2507/IJSIMM18(1)455).
- Trisyulianti, Erlin, et al. (2023): A conceptual framework for a value-based sustainability balanced scorecard. *Sustainable Development* 31 (3), S. 1536–1552. <https://doi.org/10.1002/sd.2465>.
- TU Darmstadt (Hg.) (2022): Prozessmanagement-Handbuch der TU Darmstadt. Modellierungskonventionen. Darmstadt. Online verfügbar unter [https://www.intern.tu-darmstadt.de/verwaltung/stabsstellen/it\\_und\\_prozess/it\\_u\\_p\\_prozessmanagement/prozessmgt\\_toolbox/toolbox\\_prozessmanagement.de.jsp](https://www.intern.tu-darmstadt.de/verwaltung/stabsstellen/it_und_prozess/it_u_p_prozessmanagement/prozessmgt_toolbox/toolbox_prozessmanagement.de.jsp) (abgerufen am 26.10.2023).
- TÜV SÜD (2020): Die UN-Nachhaltigkeitsziele. Online verfügbar unter <https://www.tuvsud.com/de-de/wissenswert/newsletter/value-newsletter/2-2020/un-nachhaltigkeitsziele> (abgerufen am 26.10.2023).
- Umweltbundesamt (2020): EMAS - Umweltmanagement-Gütesiegel der Europäischen Union. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/wirtschaft-umwelt/umwelt-energiemanagement/emas-umweltmanagement-guetesiegel-der-europaeischen#systematisches-umweltmanagement-mit-emas> (abgerufen am 26.10.2023).
- Umweltbundesamt (2021): Übereinkommen von Paris. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/internationale-eu-klimapolitik/uebereinkommen-von-paris#ziele-des-ubereinkommens-von-paris-uvp> (abgerufen am 26.10.2023).
- United Nations (1987): Our Common Future. Report of the World Commission on Environment and Development. Online verfügbar unter [https://gat04-live-1517c8a4486c41609369c68f30c8-aa81074.divio-media.org/filer\\_public/6f/85/6f854236-56ab-4b42-810f-606d215c0499/cd\\_9127\\_extract\\_from\\_our\\_common\\_future\\_brundtland\\_report\\_1987\\_foreword\\_chpt\\_2.pdf](https://gat04-live-1517c8a4486c41609369c68f30c8-aa81074.divio-media.org/filer_public/6f/85/6f854236-56ab-4b42-810f-606d215c0499/cd_9127_extract_from_our_common_future_brundtland_report_1987_foreword_chpt_2.pdf) (abgerufen am 26.10.2023).
- United Nations (2017): The Sustainable Development Goals Report. New York.
- United Nations (2023): Sustainability. Online verfügbar unter <https://www.un.org/en/academic-impact/sustainability> (abgerufen am 26.10.2023).
- United Nations Environment Programme (2012): Application of the Sustainability Assessment of Technologies Methodology. Guidance Manual. Online verfügbar unter [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8649/IETC\\_SAT\\_Manual\\_Nov\\_2012.pdf](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8649/IETC_SAT_Manual_Nov_2012.pdf) (abgerufen am 26.10.2023).
- United Nations (Hg.) (1992): Agenda 21. Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung, Rio de Janeiro, Juni 1992.
- Verma, Pratima, et al. (2022): Identifying and prioritizing impediments of industry 4.0 to sustainable digital manufacturing. A mixed method approach. *Journal of Cleaner Production* 356, S. 131639.
- Vezzoli, Carlo (2022): System design for sustainability in practice. Methods, tools and guidelines to design Sustainable Product-Service Systems applied to Distributed Economies. Santarcangelo di Romagna, Maggioli Editore. 2022.
- vom Brocke, Jan; Hevner, Alan; Maedche, Alexander (2020): Introduction to Design Science Research, S. 1–13. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-46781-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-46781-4_1).
- VOREST AG (2023a): Einführung ISO 14001 Umweltmanagementsystem. Online verfügbar unter <https://handbuch-managementsystem.de/umweltmanagementsystem/um-system/einfuehrung-iso-14001/> (abgerufen am 26.10.2023).



- 
- VOREST AG (2023b): Was ist Umweltmanagement nach ISO 14001? Online verfügbar unter [https://umweltmanagement.me/umweltmanagement\\_iso\\_14001/](https://umweltmanagement.me/umweltmanagement_iso_14001/) (abgerufen am 26.10.2023).
- Wang, Steve H., et al. (2015): Using Balanced Scorecard for Sustainable Design-centered Manufacturing. *Procedia Manufacturing* 1, S. 181–192. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.084>.
- Watjer, A. (2023): Pariser Klimaabkommen. Online verfügbar unter <https://www.bpb.de/kurz-knapp/lexika/das-europalexikon/309438/pariser-klimaabkommen/> (abgerufen am 26.10.2023).
- Weiß, Daniel; Müller, Roman; Lössl, Saskia (2013): Umweltkennzahlen in der Praxis. Ein Leitfaden zur Anwendung von Umweltkennzahlen in Ein Leitfaden zur Anwendung von Umweltkennzahlen in Umweltmanagementsystemen mit dem Schwerpunkt auf EMAS Umweltmanagementsystemen mit dem Schwerpunkt auf EMAS. Dessau.
- Whiteman, Gail; Walker, Brian; Perego, Paolo (2013): Planetary Boundaries. *Ecological Foundations for Corporate Sustainability. Journal of Management Studies* 50 (2), S. 307–336. <https://doi.org/10.1111/j.1467-6486.2012.01073.x>.
- Widheden, Johan; Ringström, Emma (2007): Life Cycle Assessment. In: I. Johansson; P. Somasundaran (Hg.). *Handbook for Cleaning/Decontamination of Surfaces*. Amsterdam, Elsevier Science B.V. 2007, S. 695–720.
- Wördenweber, Burkard (2020): *Technologie- und Innovationsmanagement Im Unternehmen*. 4. Aufl. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin / Heidelberg. 2020.
- Wuest, Thorsten, et al. (2014): Application of the Stage Gate Model in Production Supporting Quality Management. *Procedia CIRP* 17, S. 32–37. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.01.071>.
- Yadav, Prayag L; Han, Seung H; Rho, Jae J. (2016): Impact of Environmental Performance on Firm Value for Sustainable Investment. Evidence from Large US Firms. *Business Strategy and the Environment* 25 (6), S. 402–420. <https://doi.org/10.1002/bse.1883>.
- Zackrisson, Mats, et al. (2017): Sustainability Performance Indicators at Shop Floor Level in Large Manufacturing Companies. *Procedia CIRP* 61, S. 457–462. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.199>.
- Zalatar, W. F; Clark, E. E. (2021): Constructing a Composite Indicator for Manufacturing Companies Using Lean Metrics and Analytic Hierarchy Process. In: 2021 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2021 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), S. 328–332.
- Zschieschang, Eva (2013): *Life Cycle Assessment in Technology Development. The Case of Micro Process Engineering*. Dissertation. Darmstadt, Technische Universität. Online verfügbar unter <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/3498/> (abgerufen am 26.10.2023).

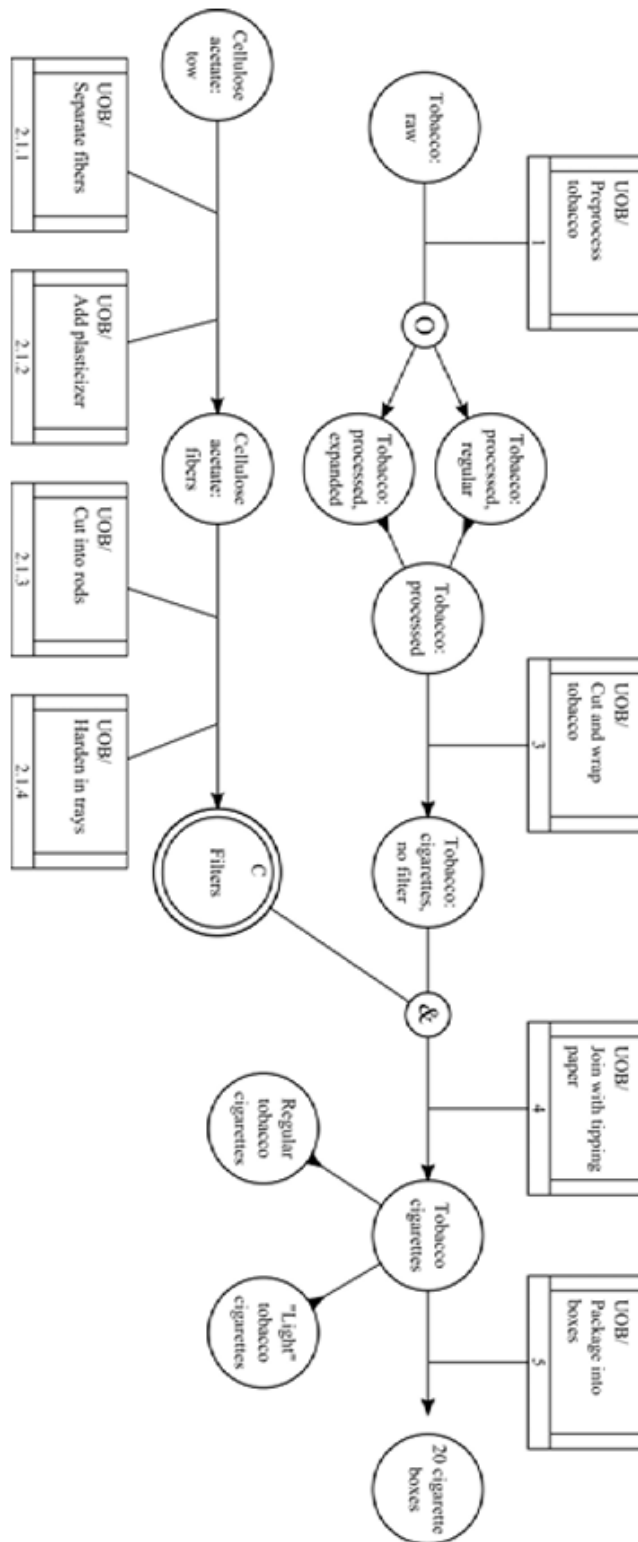
# Anhang

Anhang 1: Beispielhafte Wertstromanalyse für einen Produktionsprozess



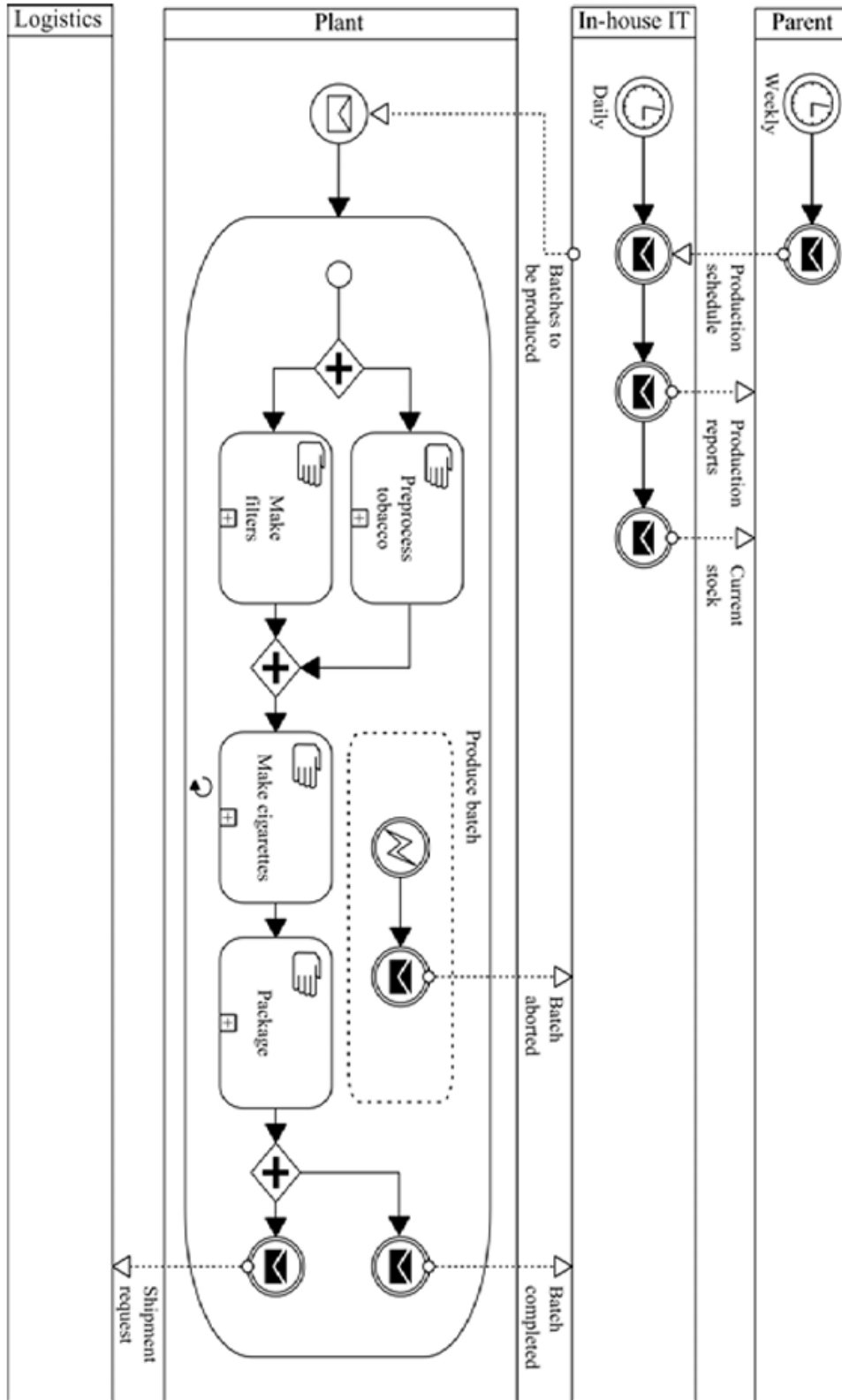
Quelle: García-Domínguez et al., S. 598

Anhang 2: Beispielhaftes IDEF3 Modell für einen Produktionsprozess



Quelle: García-Domínguez et al., S. 597

Anhang 3: Beispielhaftes BPMN 2.0 Modell für einen Produktionsprozess



Quelle: García-Domínguez et al., S. 599

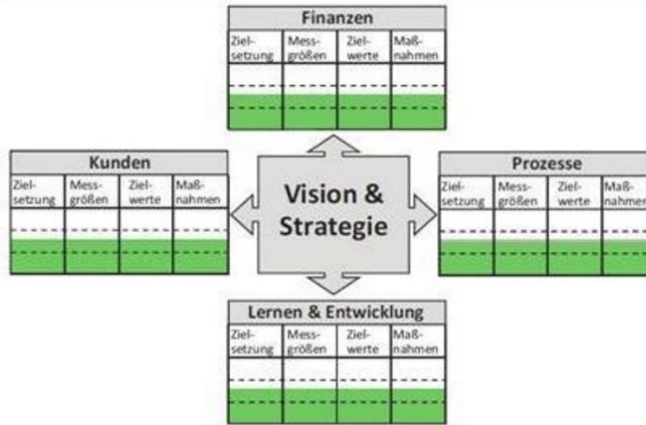
**Anhang 4: Zuordnung der SDGs zur dreigeteilten Nachhaltigkeit**

<b>SDGs zur Biosphäre (ökologisch)</b>	SDG 15 – Leben am Land SDG 14 – Leben unter Wasser SDG 6 – Sauberes Wasser und Sanitäreinrichtungen SDG 13 – Maßnahmen zum Klimaschutz
<b>SDGs zur Gesellschaft (sozial)</b>	SDG 1 – Keine Armut SDG 11 – Nachhaltige Städte und Gemeinden SDG 16 – Frieden, Gerechtigkeit und starke Institutionen SDG 7 – Bezahlbare und saubere Energie SDG 3 – Gesundheit und Wohlergehen SDG 4 – Hochwertige Bildung SDG 5 – Geschlechtergleichheit SDG 2 – Kein Hunger
<b>SDGs zur Wirtschaft (ökonomisch)</b>	SDG 8 – Menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum SDG 9 – Industrie, Innovation und Infrastruktur SDG 17 – Partnerschaften zur Erreichung der Ziele SDG 10 – Weniger Ungleichheiten SDG 12 – Nachhaltiger Konsum und Produktion

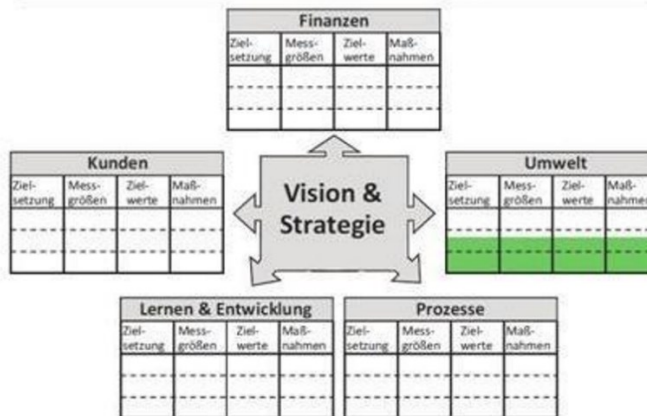
Quelle: Eigenerstellung in Anlehnung an Bundesumweltministerium. 2021

## Anhang 5: Drei Formen der SBSC

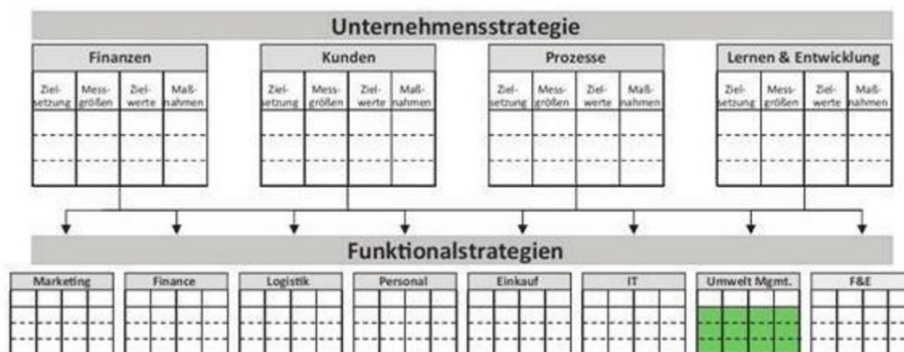
### 1 Integration in BSC-Standard-Perspektiven



### 2 Erweiterung um eine Umweltperspektive

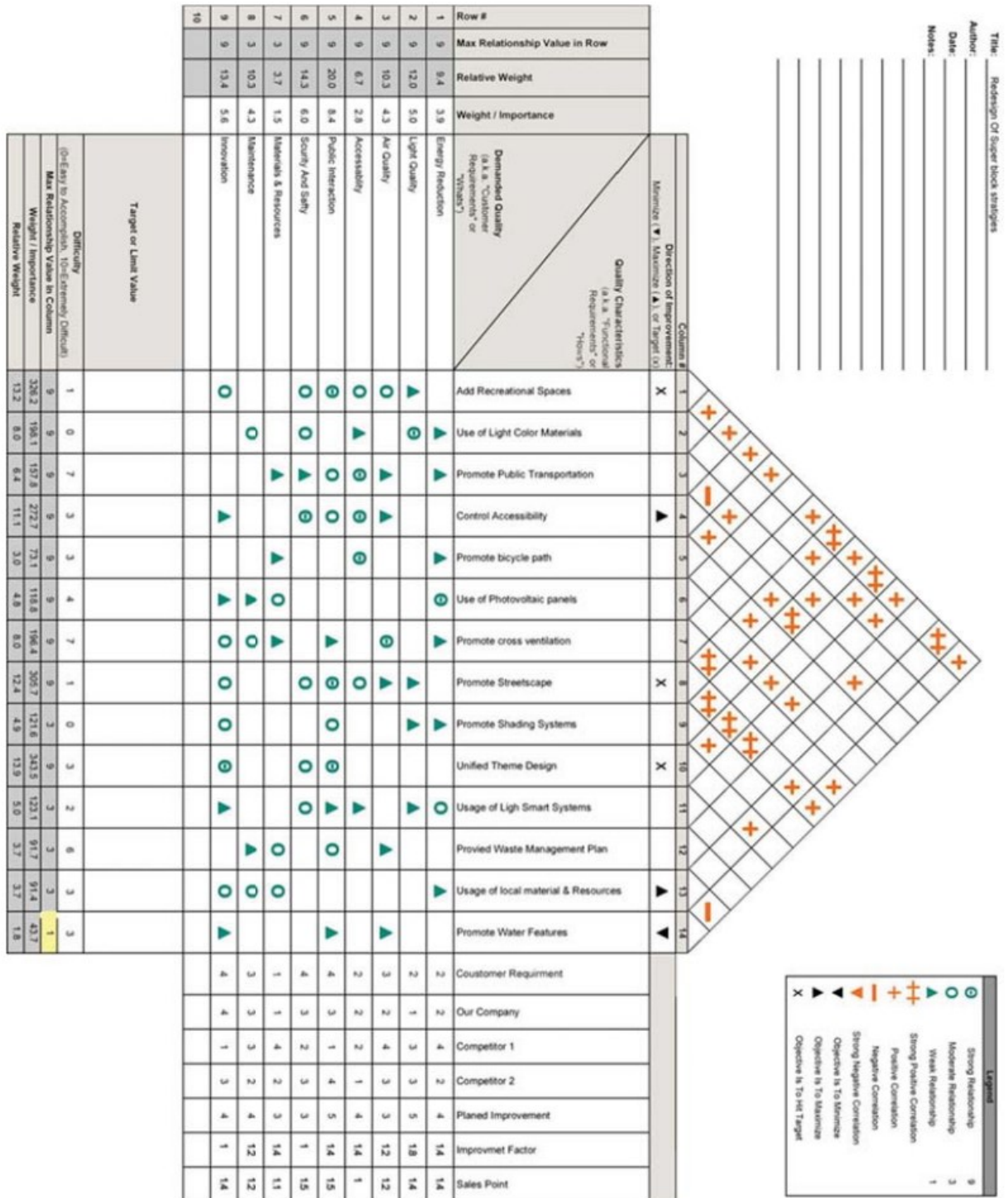


### 3 Separate Umwelt-BSC



Quelle: Ilg. 2019

Anhang 6: (Ergänzung zu Abbildung 16) Exemplarischer Aufbau einer SQFD



Quelle: Al-Aomar. 2019, S. 6

## Anhang 7: Interview-Vorlage mit allen Fragen

<b>DATUM</b> TBD	<b>INTERVIEWER</b> Jannek Hündling	<b>INTERVIEW MIT:</b> TBD	<b>ROLLE:</b> TBD
---------------------	---------------------------------------	------------------------------	----------------------

### ANMERKUNGEN

Zu Beginn der Interviews wird das Thema des Interviews motiviert, die Methodik der Forschungsarbeit besprochen und der im Rahmen der Masterthesis „Nachhaltigkeit in produzierenden Unternehmen durch Digitalisierung: Konzept zur Nutzung digitaler Technologien zur Erreichung und Verbesserung von Nachhaltigkeitszielen“ entwickelte SIA-DT Prozess (Sustainability Integrated Approach for Digital Technologies) vorgestellt. Dabei werden die Schritte, die im Rahmen der Forschungsarbeit durchgeführt werden, erklärt. Der Prozess wird den Teilnehmenden in graphischer Form präsentiert. Die Einführung in die Interviews soll auf max. 15 min beschränkt werden. Die Interviews sollen zur Evaluation und ggf. Anpassung des Prozesses genutzt werden. Dies wird den Teilnehmenden vor Beginn der Vorstellung mitgeteilt. Das Interview wird insgesamt ca. 45 Minuten dauern.

### ANONYMISIERUNG UND PSEUDONYMISIERUNG

Im Rahmen der Veröffentlichung der Masterthesis kann eine Pseudonymisierung oder Anonymisierung erfolgen: Die Präferenz des Teilnehmenden wird unten festgehalten.

- Keine Anonymisierung / Pseudonymisierung bei Veröffentlichung gefordert
- Anonymisierung / Pseudonymisierung bei Veröffentlichung
- Individuelle Absprache im Fall der Veröffentlichung

### AUDIODATEN UND TRANSKRIPTION

Das Interview wird für eine Transkription aufgezeichnet. Die wichtigsten Antworten der Teilnehmenden werden den untenstehenden Fragen zugeordnet und dem Teilnehmenden schriftlich per E-Mail zur finalen Bestätigung der Aussagen zugesandt. Nach der Bestätigung und ggf. Anpassung der Zusammenschrift werden die Audioaufzeichnungen der Interviews umgehend vernichtet. Die Zusammenschrift der Interviews wird zusammen mit der Forschungsarbeit am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen planmäßig bis zum 06. November 2023 eingereicht und unterliegt ab diesem Zeitpunkt den Datenschutzregelungen der TU Darmstadt.

#### ALLGEMEIN [A]:

Allgemeines zur Person und zur Institution / zum Unternehmen

**F1:** Wie lautet Ihre aktuelle Positionsbezeichnung?

**F2:** Wie lange sind Sie schon in Ihrer aktuellen Position tätig?

**F3:** Was ist das Kerngeschäft bzw. die Branche des Unternehmens / der Institution, bei der Sie tätig sind?

#### STELLHEBEL [S]:

Shop-Floor Stellhebel in Industrie-Unternehmen zur Erhöhung der Nachhaltigkeit durch digitale Technologien

**F1.1:** Sind Ihrer Erfahrung nach die digitalen Technologien wichtig, um Nachhaltigkeitsziele wie bspw. den Ressourcenverbrauch, Emissionen durch Prozesse und Produkte oder die Zufriedenheit der Mitarbeitenden in der Produktion zu optimieren?

**F1.2:** In welchen Bereichen der Produktion sind digitale Technologien Ihrer Meinung nach, besonders wichtig? (wenn **F1.1** befürwortet wird)



**F1.3:** Welche Bereiche sind in Ihrem Unternehmen entscheidende Stellhebel bzw. Treiber für die Erreichung von Nachhaltigkeit?

**F2:** Welche spezifischen digitalen Technologien wie bspw. KI, IoT, Robotics, Big Data, Cloud Computing, AR, VR und 3D-Printing haben sich in Ihrem Unternehmen als besonders wirksam erwiesen um die Leistung und Nachhaltigkeit im Unternehmen / der Institution, an der Sie tätig sind zu steigern?

**F3.1:** Welchen der Technologien KI, IoT, Robotics, Big Data, Cloud Computing, AR, VR und 3D-Printing oder der in **F2** genannten Technologien würden Sie die insgesamt höchste Bedeutung zuordnen, wenn es um die Erreichung einer nachhaltigen produzierenden Industrie geht?

**F3.2:** Welche Technologie hat für die Erreichung einer sozialen Nachhaltigkeit in der Industrie die größte Bedeutung?

**F3.3:** Welche Technologie hat für die Erreichung einer ökonomischen Nachhaltigkeit in der Industrie die größte Bedeutung?

**F3.4:** Welche Technologie hat für die Erreichung einer ökologischen Nachhaltigkeit in der Industrie die größte Bedeutung?

#### SYSTEMATISIERUNG [SY]

Systematisierung eines Einsatzes digitaler Technologien für die Nachhaltigkeitserreichung

**F1:** Wie würden Sie den Einfluss eines praxis- und management-orientierten Ansatzes wie dem SIA-DT Prozessmodell, für die Systematisierung der Erreichung von Nachhaltigkeit in der Industrie einschätzen?

**F2:** Gibt es für Digitalisierungsprojekte in Ihrem Unternehmen / an Ihrer Institution bereits einen Standard-Prozess welcher Nachhaltigkeitsziele bei der Planung sowie der Implementierung von digitalen Technologien integriert?

Ja /  Nein /  Keine Antwort

**F3:** Würden Sie einige Phasen des Unternehmens-Standards in Ihrem Unternehmen zu den Phasen des SIA-DT ergänzen und wenn Ja, welche Phasen / Gates des Standards würden Sie zum SIA-DT ergänzen?

**F4:** Welche organisatorischen, prozessualen und ggf. unternehmenskulturelle Hürden und Herausforderungen sehen Sie, wenn der SIA-DT Prozess in Ihrem Unternehmen als Prozessstandard eingeführt würde?

**F5:** Müssten Ihrer Erfahrung nach, neben dem Nachhaltigkeitsmanagement, dem Projektmanagement, den technischen Experten und Expertinnen und dem Top Management, weitere Stakeholder im Unternehmen / in der Institution in den Prozess mit eingebunden werden und wenn Ja, welche weiteren Stakeholder müssten in den Prozessablauf mit eingebunden werden?

**F6:** Welche Probleme traten bei der Bewertung von Technologien in Bezug auf Nachhaltigkeit auf?

#### UMWELTMANAGEMENT [U]:

Einbettung des SIA-DT  
(Sustainability Integrated)

**F1:** Welche Rahmenwerke und Standards sind besonders bedeutend für die Erreichung von Nachhaltigkeit in der Industrie?

Approach for Digital Technologies) Prozess in Managementsystemen

**F2:** Welcher Bedeutung würden Sie Normen wie DIN EN ISO 14001, DIN EN ISO 26000 zu Umweltmanagementsystemen zuordnen?

**F3:** Warum bedarf es neben diesen Normen weiterer Ansätze zur Systematisierung des nachhaltigen Managements wie der SBSC?

**F4:** Welche Nachhaltigkeitsrahmenwerke und Managementsysteme wie bspw. die DIN EN ISO 14001, DIN EN ISO 26000, SBSC etc., schätzen Sie als besonders geeignet für die Einbettung des vorgestellten SIA-DT ein?

**F5:** Welche Nachhaltigkeitssysteme werden in großen, mittleren und kleinen Unternehmen am häufigsten verwendet?

**F6:** Welche Umweltmanagementsysteme oder ähnliche Managementsysteme wie dem der DIN EN ISO 14001 oder 26000 werden im Unternehmen / an der Institution, an der Sie tätig sind, bereits eingesetzt?

**F7:** Wie sind diese Managementsysteme in der Organisation des Unternehmens / der Institution verankert?

**F8:** Wo liegen, bei aktuellen Standards und Rahmenwerken, die Schnittstellen zwischen den Digitalisierungsprozessen und den Nachhaltigkeitsmanagementprozessen?

**F9:** Welche Schnittstellen fehlen ggf. im SIA-DT noch?

**F10:** Worauf muss bei der Integration des SIA-DT Prozesses in ein bestehendes Umwelt- bzw. Nachhaltigkeitsmanagementsystem geachtet werden?

**F11:** Was sind die größten Hürden (organisatorisch, kulturell, managementbezogen, methodisch) bei der Integration des SIA-DT Prozesses in ein bestehendes Umwelt- bzw. Nachhaltigkeitsmanagementsystem?

**F12:** Denken Sie das die Implementierung des SIA-DT Prozesses in der Industrie Potenzial hätte, die Umweltleistung bzw. Nachhaltigkeit auf Unternehmensebene zu verbessern?

**F13:** Welche Anreize für Unternehmen müssten geschaffen werden, den SIA-DT Prozess zu integrieren?

## IMPLEMENTIERUNG [I]

Erweiterung des prozessualen Ansatzes DMME für die Implementierung der Technologien

**F1:** Haben Sie schon einmal vom sogenannten DMME bzw. CRISP-DM Modell gehört und wenn Ja, wie setzen Sie diesen an der Institution / im Unternehmen, in dem Sie tätig sind, ein?

**F2:** Sind Ihnen Versuche bekannt, den DMME für die Implementierung anderer digitaler Technologien einzusetzen als der Implementierung von Künstlicher Intelligenz?

**F3:** Wie würden Sie den Einsatz des DMME Prozesses als generalen Implementierungsprozess für datengetriebene Technologien bewerten?

**F4:** Welche Gründe sprechen Ihrer Meinung für oder gegen die Nutzung des DMME bzw. CRIPS-DM Modell als Prozessmodell bei der nachhaltigkeitsorientierten Implementierung von digitalen Technologien?

---

**F5:** Wie hoch würden Sie den Nutzen einschätzen, den der Einsatz des DMME oder CRISP-DM Prozess aktuell im Unternehmen / an der Institution, an der Sie beschäftigt sind, erbringt?

**F6:** Denken Sie, dass der SIA-DT Prozess ohne großen Aufwand in Bereichen des Unternehmens / der Institution, an der Sie tätig sind, eingesetzt werden?

**F7:** Falls noch nicht im SIA-DT vorhanden: welche Phasen sind Ihrer Meinung nach kritisch, wenn es um die Integration von Nachhaltigkeit in Implementierungsmodelle wie dem DMME oder CRISP-DM geht?

**F8:** Wie schätzen Sie die Struktur des SIA-DT, im Bezug zur Integration des DMME Prozesses ein?

**F9:** Welche Faktoren könnten die Skalierbarkeit des SIA-DT Prozesses beeinflussen?

**F10:** Nach Ihrer Expertise: Welches Vorgehen würden Sie empfehlen, um den SIA-DT neben den durchgeführten Experteninterviews auf Anwendbarkeit, Verständlichkeit und Nutzen zu evaluieren?

**F11:** In der strategischen Nachhaltigkeitsreifegradbewertung (SIA-DT Phase 1) werden Reifegradmodelle eingesetzt, da diese als Empfehlungen in der Literatur genannt werden. Welche Methoden setzen Sie bei der strategischen Nachhaltigkeitsbewertung ein bzw. würden Sie hierfür empfehlen?

**F12:** In der Nachhaltigkeits- und Risikobewertung (SIA-DT Phase 6) der möglichen Technologieoptionen wird die LCA eingesetzt, da diese als Empfehlung in der Literatur genannt wird. Welche Methoden setzen Sie bei der Nachhaltigkeitsbewertung von Produkten, Prozessen und Technologien ein bzw. würden Sie hierfür empfehlen?

**F13:** In der detaillierten technischen und nachhaltigkeitsbezogenen Bewertung des technischen Konzepts (SIA-DT Phase 9) der ausgewählten Technologie wird die SFD eingesetzt, da diese als Empfehlung in der Literatur genannt wird. Welche Methoden setzen Sie bei der Nachhaltigkeitsbewertung von technischen Konzepten ein bzw. würden Sie hierfür empfehlen?

**F14:** In der letzten Phase des SIA-DT Prozesses (Phase 12) sollen die Nachhaltigkeitsdaten verwaltet und in ein kontinuierliches Monitoring für das mittlere und das Top Management überführt werden. Wie werden im Unternehmen / der Institution, bei der Sie arbeiten aktuell Nachhaltigkeitsdaten erhoben, gespeichert, verwaltet und für Entscheidungsträger aufbereitet bzw. welche Methoden schlagen Sie hier vor?

**F15:** Denken Sie, dass der PDCA-Zyklus in den einzelnen Phasen genutzt werden kann, um eine kontinuierliche Verbesserung des SIA-DT zu erreichen?

## CASES [C]

**F1:** Haben Sie aktuelle oder bereits beendete Projektbeispiele dafür, wie der Einsatz von digitalen Technologien in Ihrem

---

Aktueller Einsatz digitaler  
Technologien in der Fertigung

Arbeitsumfeld zur Erreichung eines ökologischen, ökonomischen  
oder sozialen Nachhaltigkeitsziels beigetragen hat?

**F2:** Welche Schritte wurden bei der Implementierung durchlau-  
fen? (Wenn **F1** mit Ja beantwortet wurde)

**F3:** Welche weiteren oder zukünftigen Anwendungsfälle für digi-  
tale Technologien zur Steigerung der Nachhaltigkeit sehen Sie im  
Unternehmen / in der Institution, bei der Sie tätig sind?

**F4:** Welche Zusammensetzung hatte das Projektteam bei diesen  
Projekten? (Wenn **F1** mit Beispielen beantwortet wird)

Quelle: Eigenerstellung

## Anhang 8: Antworten zum Experten/Expertinnen-Interview 1

<b>DATUM</b> 08.08.2023	<b>INTERVIEWER</b> Jannek Hündling	<b>INTERVIEW MIT:</b> [Anonym]	<b>ROLLE:</b> Head of Digital Transformation & OT
----------------------------	---------------------------------------	-----------------------------------	---

### ANMERKUNGEN

Zu Beginn der Interviews wird das Thema des Interviews motiviert, die Methodik der Forschungsarbeit besprochen und der im Rahmen der Masterthesis „Nachhaltigkeit in produzierenden Unternehmen durch Digitalisierung: Konzept zur Nutzung digitaler Technologien zur Erreichung und Verbesserung von Nachhaltigkeitszielen“ entwickelte SIA-DT Prozess (Sustainability Integrated Approach for Digital Technologies) vorgestellt. Dabei werden die Schritte, die im Rahmen der Forschungsarbeit durchgeführt werden, erklärt. Der Prozess wird den Teilnehmenden in graphischer Form präsentiert. Die Einführung in die Interviews soll auf max. 15 min beschränkt werden. Die Interviews sollen zur Evaluation und ggf. Anpassung des Prozesses genutzt werden. Dies wird den Teilnehmenden vor Beginn der Vorstellung mitgeteilt. Das Interview wird insgesamt ca. 45 Minuten dauern.

### ANONYMISIERUNG UND PSEUDONYMISIERUNG

Im Rahmen der Veröffentlichung der Masterthesis kann eine Pseudonymisierung oder Anonymisierung erfolgen: Die Präferenz des Teilnehmenden wird unten festgehalten.

- Keine Anonymisierung / Pseudonymisierung bei Veröffentlichung gefordert
- Anonymisierung / Pseudonymisierung bei Veröffentlichung
- X Individuelle Absprache**

### AUDIODATEN UND TRANSKRIPTION

Das Interview wird für eine Transkription aufgezeichnet. Die wichtigsten Antworten der Teilnehmenden werden den untenstehenden Fragen zugeordnet und dem Teilnehmenden schriftlich per E-Mail zur finalen Bestätigung der Aussagen zugesandt. Nach der Bestätigung und ggf. Anpassung der Zusammenschrift werden die Audioaufzeichnungen der Interviews umgehend vernichtet. Die Zusammenschrift der Interviews wird zusammen mit der Forschungsarbeit am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen planmäßig bis zum 06. November 2023 eingereicht und unterliegt ab diesem Zeitpunkt den Datenschutzregelungen der TU Darmstadt.

### ALLGEMEIN [A]:

Allgemeines zur Person und zur Institution / zum Unternehmen

**F1:** Wie lautet Ihre aktuelle Positionsbezeichnung?

**A1:** Meine Positionsbezeichnung ist Head of Digital Transformation & OT für die Produktion.

**F2:** Wie lange sind Sie schon in Ihrer aktuellen Position tätig?

**A2:** Ein Jahr minus einer Woche. Schon im Studium habe ich damit angefangen mich mit Digitalisierung zu beschäftigen. Als Ingenieur beschäftige ich mich mit diesen Themen, wie wir Unternehmen digitalisieren können, seit 7 bis 8 Jahren.

**F3:** Was ist das Kerngeschäft bzw. die Branche des Unternehmens / der Institution, bei der Sie tätig sind?

**A3:** Natural Ingredients, also Getränke Compounds, Getränkegrundstoffe, aber auch getrocknete Früchte. In der

## **STELLHEBEL [S]:**

Shop-Floor Stellhebel in Industrie-Unternehmen zur Erhöhung der Nachhaltigkeit durch digitale Technologien

*Backindustrie sind wir mit unseren Produkten ebenfalls vertreten. Wir stellen verschiedenste Grundstoffe für Getränke (natürliche Ingrediens) her.*

**F1.1:** Sind Ihrer Erfahrung nach die digitalen Technologien wichtig, um Nachhaltigkeitsziele wie bspw. den Ressourcenverbrauch, Emissionen durch Prozesse und Produkte oder die Zufriedenheit der Mitarbeitenden in der Produktion zu optimieren?

*A1.1: Ich glaube das die Digitalisierung ein absoluter Gamechanger ist. Sprich: Wir wollen keine inkrementelle Verbesserung hinbekommen, sondern vielmehr einen richtigen Sprung.*

**F1.2:** In welchen Bereichen der Produktion sind digitale Technologien Ihrer Meinung nach, besonders wichtig? (wenn **F1.1** befürwortet wird)

*A1.2: Im Unternehmen haben wir verschiedene Bereiche, wenn es um die Digitalisierung geht. Die bedeutenden Bereiche sind diejenigen, wo wir einen hohen Energieeinsatz aufbringen. Wir haben viele klassische Verdampfungsprozesse. Möchte man zum Beispiel aus Apfelsaft das Apfelsaftkonzentrat gewinnen, dann muss zunächst das Wasser mit viel Energie verdampft werden. Dieser Prozess ist extrem energieintensiv. Gefriertrocknende Prozesse sind ebenfalls energieintensiv und kommen bei uns zum Einsatz. Das sind zwei Bereiche, bei denen wir beim Thema Nachhaltigkeit viel erreichen können. Sie sind besonders wichtig. Was natürlich auch interessant ist, sind unsere Gebäude und Anlagen. Wir sehen sehr oft, dass unsere Kompressoren oder Warmwasseraufbereitung am Wochenende laufen und dadurch Energie verbraucht wird. Diese Energie könnten wir sparen, wenn wir Anlagen gezielt abschalten würden. Bei einem einzelnen Werk könnten das z. B. 4% Einsparungen bezogen auf den Energieverbrauch sein. Das wäre ein Riesen-Stellhebel. Wichtige Bereiche sind auch überall dort, wo Mitarbeitende mit hoher Komplexität konfrontiert sind. Ich meine hier. Komplexität die Mitarbeitende nicht allein auf Grundlage der gesammelten Erfahrung handhaben können. Hier bedarf es dann Unterstützungssysteme.*

**F1.3:** Welche Bereiche sind in Ihrem Unternehmen entscheidende Stellhebel bzw. Treiber für die Erreichung von Nachhaltigkeit?

*A1.3: Das größte Thema ist für uns das Digital Backbone oder auch Digital Factory Backbone. Dabei sammeln wir die Daten von allen Steuerungen ein und machen Sie in Echtzeit global verfügbar. Das ist ein Gamechanger für die ganze Organisation, weil wir einsehen können, was gerade an welchem Standort passiert. Man könnte hier auch vom Türöffner für alle weiteren Projekte zur Steigerung der Nachhaltigkeit sprechen. Mit dem Digital Backbone beantworten wir viele Fragen: Wie können wir unsere Energien besser einsetzen? Wie können wir Abfall in unseren Wertschöpfungsprozessen minimieren; wie kann man Personal besser einsetzen, bis zur Frage: Wie wir den Alltag unserer Mitarbeitenden so angenehm wie möglich gestalten können. Es geht auch darum,*

---

*was die effizientesten Fertigungsverfahren für die jeweiligen Prozesse und Produkte sind. Hier können wir die Fragen beantworten: Wo kann ich etwas am günstigsten produzieren und wo kann ich Produkte mit dem geringsten CO<sub>2</sub> Footprint herstellen? Im besten Fall können pro Liter den wir verkaufen sagen wie der CO<sub>2</sub> Footprint ist und wo dieser entsteht. Wieviel produziert wird und andere weitere wichtige Daten sehen wir bereits in Echtzeit für die ersten fünf Werke. Bis Ende des nächsten Jahres wollen wir weltweit ausrollen. Das ist ein großer Gamechanger, weil wir viele Werke betreiben, die sich vom Mindset und technologiezeitig eher als traditionelle Werke sehen. Diese Werke haben gute Fachkräfte in der Produktion, die eine hohe Prozessexpertise besitzen. Wenn wir diese Prozesse digitalisieren, können wir in Echtzeit unsere Performance an diesen Prozessen sehen. Auch das Personal in der Produktion profitiert davon. Der erste Stellhebel sind daher die Daten. Der zweite Stellhebel sind Roboter. Tätigkeiten, die von Robotern ausgeführt werden können, sind oft effizienter und weisen eine gleichmäßig hohe Qualität auf. Das Personal der Produktion können wir dann für andere Aufgaben einsetzen, die dem Unternehmen einen höheren Wert bringen. Das Thema Smart Execution, sprich wie kann ich meinen Fachkräften helfen, die Arbeit besser auszuführen, hat ebenfalls Priorität. Technologien wie Künstliche Intelligenz in der Produktion, digitale Checklisten, Smartwatches etc. helfen uns immer effizienter zu werden. Hierzu gehören auch Digital Lean und andere Themen. Augmented und Virtual Reality sind genauso wichtig, denn durch diese Technologie erreichen wir, dass unser Personal besser trainiert werden kann und infolgedessen weniger Fehler macht. Weniger Fehler heißt: Weniger Abfall, eine bessere Sensibilisierung für Energieverbräuche und gleichzeitig, dass weniger Reisen anfallen. Die Mitarbeitenden können zudem deutlich früher trainiert werden. Das bedingt dass wir die Produktion schneller hochfahren können. Das sind die vier großen Stellhebel, die wir fokussieren. Diese Stellhebel sind die vier strategischen Säulen des Unternehmens.*

**F2:** Welche spezifischen digitalen Technologien wie bspw. KI, IoT, Robotics, Big Data, Cloud Computing, AR, VR und 3D-Printing haben sich in Ihrem Unternehmen als besonders wirksam erwiesen um die Leistung und Nachhaltigkeit im Unternehmen / der Institution, an der Sie tätig sind zu steigern?

*A2: Wir sind mit dieser Technologie im ersten Jahr, aber wie schon gesagt: Die Gamechanger Technologien im Digital Backbone sind: IoT, Edge Computing, Cloud Computing und Big Data. Es sind logischerweise noch mehr Technologien im Digital Backbone enthalten. Das ganze Thema Robotics und humanoide Roboter ist wichtig. Unsere Roboter sind alle Vision enabled. Die Roboter haben alle Sensorik verbaut und in der Zukunft wird sicher für uns auch noch KI eine Schlüsseltechnologie werden, da wir dann alle globalen Unternehmensdaten haben. Die Technologien sind dabei nicht einzeln zu implementieren. Eine alleinstehende Implementierung gelingt vielleicht in einem akademischen Umfeld, aber bei uns*

*müssen Technologien verknüpft werden, damit eine Technologie wie bspw. IoT seinen Mehrwert generiert. Das heißt es reicht nicht einfach nur alle Maschinen mit Sensoren auszustatten.*

**F3.1:** Welchen der Technologien KI, IoT, Robotics, Big Data, Cloud Computing, AR, VR und 3D-Printing oder der in **F2** genannten Technologien würden Sie der insgesamt höchste Bedeutung zuordnen, wenn es um die Erreichung einer nachhaltigen produzierenden Industrie geht?

*A3.1: Es ist herausfordernd einzelne Technologien zu ranken, weil eigentlich alle Gamechanger sein können, wenn man sie richtig einsetzt. Was heute für uns im Großen und Ganzen den größten Wert erbringt sind Technologien wie IoT, Edge Computing und Big Data, weil sie uns ermöglichen zu sehen was passiert und was in der Vergangenheit passiert ist. In Zukunft wird sicherlich das ganze Thema Robotik und KI sehr wichtig werden. Wir differenzieren nicht mehr weiter zwischen ökonomischer und sozialer / ökologischer Nachhaltigkeit da die Bedürfnisse zusammen liegen. Wenn wir unsere Logistik Wege optimieren, muss das Personal weniger Stapler fahren. Wir brauchen weniger Energie, haben weniger Reifenabrieb und sparen Geld.*

**F3.2:** Welche Technologie hat für die Erreichung einer sozialen Nachhaltigkeit in der Industrie die größte Bedeutung?

*A3.2: Vergleiche A3.1*

**F3.3:** Welche Technologie hat für die Erreichung einer ökonomischen Nachhaltigkeit in der Industrie die größte Bedeutung?

*A3.3: Vergleiche A3.1*

**F3.4:** Welche Technologie hat für die Erreichung einer ökologischen Nachhaltigkeit in der Industrie die größte Bedeutung?

*A3.4: Vergleiche A3.1*

## **CASES [C]**

Aktueller Einsatz digitaler Technologien in der Fertigung

**F1:** Haben Sie aktuelle oder bereits beendete Projektbeispiele dafür, wie der Einsatz von digitalen Technologien in Ihrem Arbeitsumfeld zur Erreichung eines ökologischen, ökonomischen oder sozialen Nachhaltigkeitsziels beigetragen hat?

*A1: Ja, mit dem Digital Backbone haben wir 4 % Energieeinsparung innerhalb weniger Tage identifiziert. Das ist eine ökologische und ökonomische Nachhaltigkeitssteigerung. Wir machen auch Robotik Projekte. Wir pilotieren beispielsweise Wischroboter oder Roboterhunde.*

**F2:** Welche Schritte wurden bei der Implementierung durchlaufen? (Wenn **F1** mit Ja beantwortet wurde)

*A2: Wir sind keinem vorgegebenen Prozess gefolgt. Wir haben einen Prozess und der heißt: Wir machen einen Piloten und wenn der erfolgreich ist, dann rollen wir schnell global aus. Alles andere haben wir mit viel Verständnis und viel Erfahrung entwickelt. Wir haben einzelne Werke betrachtet, als wir angefangen haben zu digitalisieren und geschaut, was die größten Hebel sind, an denen man ansetzen kann. Wir haben auch festgestellt, welche Technologien für unser Digital Factory Backbone am stabilsten laufen,*



---

denn wir können keine Technologien global ausrollen die noch in den Kinderschuhen stecken.

**F3:** Welche weiteren oder zukünftigen Anwendungsfälle für digitale Technologien zur Steigerung der Nachhaltigkeit sehen Sie im Unternehmen / in der Institution, bei der Sie tätig sind?

*A3: Übersprungen.*

**F4:** Welche Zusammensetzung hatte das Projektteam bei diesen Projekten? (Wenn **F1** mit Beispielen beantwortet wird)

*A4: Wir sind relativ Lean aufgestellt. Wenn man das größte Projekt anschaut, das Digital Backbone, das habe ich selbst von Idee bis Pilot entwickelt. Die IT-Abteilung war noch mit dabei. Mittlerweile gibt es noch einen technischen Kollegen und einen, der die Prozesse verwaltet und das gemeinsame Ausrollen steuert. Wir versuchen immer gutes und qualifiziertes Personal für das Unternehmen und Projekte zu gewinnen und dann skalierbare Prozesse zu gestalten. Die Größe des Projektteams ist zweitranging. Und wenn es in die Rollouts geht, sind wir bereits stark standardisiert. Jedes Werk funktioniert bei uns gleich, auch wenn einzelne Werke individuelle Bereiche und Prozesse aufweisen. Unser Standard Rollout Prozess hat bisher in allen Werken funktioniert. Bei den Robotik Projekten drehen wir ebenfalls keine riesigen Runden. Wir besprechen uns, finden eine geeignete Idee, und gehen mit dieser die Idee den Weg und probieren es einfach aus. Wir schauen wer Lust hat mitzumachen und setzen das Projekt um.*

**F5:** Welche weiteren oder zukünftigen Anwendungsfälle für digitale Technologien zur Steigerung der Nachhaltigkeit sehen Sie im Unternehmen / in der Institution, bei der Sie tätig sind?

*A5: Bei uns sind es immer wieder die vier Säulen, aus denen die Projekte entspringen. Digital Backbone, Smart Execution, Robotics, Augmented Reality und Virtual Reality. Daraus leiten sich dann unterschiedlich viele Projekte ab.*

### **SYSTEMATISIERUNG [SY]**

Systematisierung eines Einsatzes digitaler Technologien zur Nachhaltigkeitserreichung

**F1:** Wie würden Sie den Einfluss eines praxis- und management-orientierten Ansatzes wie dem SIA-DT Prozessmodell, für die Systematisierung der Erreichung von Nachhaltigkeit in der Industrie bzw. in Ihrem Unternehmen einschätzen?

*A1: Ich glaube, ein Standardprozess ist immer relevant, wenn man sehr viele Mitarbeitende hat, die in einem Aufgabenfeld arbeiten. Dort braucht es Standards, um Abläufe zu strukturieren. Diese Situation haben wir aktuell bei uns im Unternehmen noch nicht. Wir sind ein eher kleines Team bei solchen Projekten. Digitale Projekte in der Produktion werden von weniger als zehn Personen vorangetrieben. Wir orientieren uns immer wieder an unseren strategischen vier Säulen. Und dann gestalten wir Piloten dazu. Wir machen lieber ein bisschen mehr Piloten und nehmen Piloten die scheitern in Kauf, als dass wir gute Ideen so lange diskutieren, bis das Interesse weg ist. Wir merken immer wieder, dass wir durch den Piloten so viel lernen, wie wir niemals durch reines Diskutieren erreichen könnten. Das ist auch unser Ansatz, den wir verfolgen. Lieber 80 % Erfolgchance aber dafür mit hohem Tempo.*

---

*Dann sind wir schneller am Ziel, als wenn wir alles bis ins kleinste definieren. Das hat aber auch mit der Unternehmenskultur zu tun. Wir sind sehr agil und Hands-on organisiert. Trotzdem habe ich natürlich auch einen gewissen weltweiten Plan für Digitalisierungsprojekte. Das läuft dann aber so: Idee, Pilotprojekt und Roll-out. Mehr brauchen wir nicht. Wir machen es Case by Case. Und wir sind nur die Enabler. Nachhaltigkeit wird durch andere Rollen im Unternehmen getrieben. Wir bauen gerade den Bereich Production Steering auf. Das neue Team treibt weltweit die Produktionseffizienz voran, auch in Nachhaltigkeitsthemen, vor allem auch durch Nachhaltigkeitsziele. Dort wird sehr KPI getrieben gearbeitet und die Werke müssen sich dann überlegen, wie sie diese KPIs mit Projekten erreichen können. Eine komplexe und standardisierte Projektsteuerung mit Nachhaltigkeitsbezug passt aktuell nicht zu unserem Ansatz der agilen Projektsteuerung. Auch das schnelle Wachstum des Unternehmens macht den Einsatz eher schwierig.*

**F2:** Gibt es für Digitalisierungsprojekte in Ihrem Unternehmen / an Ihrer Institution bereits einen Standard-Prozess welcher Nachhaltigkeitsziele bei der Planung sowie der Implementierung von digitalen Technologien integriert?

*A2: Nein, dafür sind wir aktuell zu wenig Personal im Projektteam. Ich glaube, es ist tatsächlich auch in den anderen Unternehmen so, dass solche Projekte von denen getrieben werden, die viel mit der Digitalisierung zu tun haben. Und das sind meistens gute Leute, die gute Projekte erreichen. Wir haben schlicht und einfach nicht die Anzahl an Mitarbeitern, um einen solchen Prozess aufzusetzen. Da macht solch ein Standardprozess erst einmal wenig Sinn.*

**F3:** Würden Sie einige Phasen des Unternehmens-Standards in Ihrem Unternehmen zu den Phasen des SIA-DT ergänzen und wenn Ja, welche Phasen / Gates des Standards würden Sie zum SIA-DT ergänzen?

*A3: Vergleiche A2*

**F4:** Welche organisatorischen, prozessualen und ggf. unternehmenskulturelle Hürden und Herausforderungen sehen Sie, wenn der SIA-DT Prozess in Ihrem Unternehmen als Prozessstandard eingeführt würde?

*F4: Hürden sind, dass wir in unserer Unternehmenskultur den Fokus auf Selbstständigkeit und Flexibilität legen. Wir haben im Unternehmen ein Hands-on Mindset etabliert. Bis wir einen standardisierten Prozess eingeführt haben, können wir fünf Projekte durchführen, die uns einen größeren Wert bringen. Wir haben in unserem agilen Mindset aktuell keine Notwendigkeit für komplexe Standards. Aus meiner Erfahrung heraus kann ich sagen: Wenn man eine Vielzahl an Entwicklungsprojekten parallel vorantreibt, dann muss natürlich überlegt werden, wie das Vorgehen mit Prozessen standardisiert werden kann. Wir sind aktuell von dieser hohen Zahl an Projekten weit weg.*

**F5:** Müssten Ihrer Erfahrung nach, neben dem Nachhaltigkeitsmanagement, dem Projektmanagement, den technischen Experten und Expertinnen und dem Top Management, weitere Stakeholder im Unternehmen / in der Institution in den Prozess mit eingebunden werden und wenn Ja, welche weiteren Stakeholder müssten in den Prozessablauf mit eingebunden werden?

*A5: Also grundsätzlich wollen wir, dass alle Mitarbeitende an der Nachhaltigkeit des Unternehmens arbeiten. Und grundsätzlich gibt es bei uns keine reine wirtschaftliche Projektleitung. Unsere Projektleitung kann auch immer vieles selbst. Es sind Schnittstellenpositionen, die technisch und wirtschaftlich arbeiten können und kommunikationsstark sind. Das ist wichtig, wenn es darum geht, alle mitzunehmen. Also wenn wir unsere Projekte ausrollen, sind alle dabei. Schichtleitung, Werksleitung, Produktionsleitung, qualifizierte Technikerinnen und Techniker sind alle mit an Bord. Das ist wichtig, weil wir glauben, dass Nachhaltigkeit eine grundsätzliche Veränderung der Art wie wir arbeiten ist. Wir schreiben daher gerne Stellen für Projekt-Ingenieure und Projekt-Ingenieurinnen aus, da wir Fachkräfte brauchen, die technisches Wissen besitzen aber auch das Geschäft verstehen und die gute Social Skills haben und mit allen Ebenen im Unternehmen kommunizieren können. Was bei uns das Besondere ist: Wir führen immer mehr große Projekte durch. Das Digital Backbone transformiert beispielsweise jedes einzelne Werk. Schnittstellen Positionen sind daher absolut wichtig. Man muss zum Beispiel der IT erklären können, wie das Security Konzept aussehen kann. Am nächsten Tag redet man mit den Automatisierungsexperten und -expertinnen und am darauffolgenden Tag wiederum, spricht man mit dem Produktionsmanagement. Die Digitalisierung, so zumindest meine Erfahrung, bringt alle Rollen immer ein Stückchen näher zusammen. Das sehen wir gerade in großen Projekten. Über 50 % davon sind People Management Aufgaben. Gerade weil wir vor nicht allzu langer Zeit noch sehr viel dezentraler aufgestellt waren.*

**F6:** Welche Probleme traten bei der Bewertung von Technologien in Bezug auf Nachhaltigkeit auf.

*A6: Als Beispiel für alle Investitionsprojekte, die wir global machen, gucken wir uns immer im System an, wie die Energieeinsparungen aussehen würden. In dem Bereich sind wir relativ weit.*

### **(IMPLEMENTIERUNG [I])**

Erweiterung des prozessualen Ansatzes DMME für die Implementierung der Technologien

**F11:** In der strategischen Nachhaltigkeitsreifegradbewertung (SIADT Phase 1) sollen Reifegradmodelle eingesetzt werden, da diese als Empfehlung in der Literatur genannt werden. Welche Methoden setzen Sie bei der strategischen Nachhaltigkeitsbewertung ein bzw. würden Sie hierfür empfehlen?

*A11: Ich persönlich glaube, wenn man Expertinnen und Experten hat, die Digitalisierung verstehen und empathisch sind, kann das Gap in der Produktion schnell aufgedeckt und Probleme identifiziert werden. Wenn man dabei einem Maturity Fragebogen macht, wird das auf wenig Verständnis stoßen. Reifegradbewertungen sind immer relativ schwer durchzuführen. Eine große*

---

*Frage ist immer, gegen welche Zielwerte ich den Benchmark durchführe. Ich kann heute sagen, wo wir stehen und wo wir hinführen müssen. Aber ob man das jetzt mit einem Fragebogen herausgefunden hätte, da bin ich mir nicht sicher. Unsere Erfahrung und unser Verständnis sind dort einfach wichtiger. Wir setzen uns zusammen und versuchen Ideen zu realisieren. Ideen, an welchen Stellen wir digitalisieren können, haben wir genug.*

**F12:** In der Nachhaltigkeits- und Risikobewertung (SIA-DT Phase 6) der möglichen Technologieoptionen wird die LCA eingesetzt, da diese als Empfehlung in der Literatur genannt wird. Welche Methoden setzen Sie bei der Nachhaltigkeitsbewertung von Produkten, Prozessen und Technologien ein bzw. würden Sie hierfür empfehlen?

*A12: Keine Antwort*

**F13:** In der detaillierten technischen und nachhaltigkeitsbezogenen Bewertung des technischen Konzepts (SIA-DT Phase 9) der ausgewählten Technologie wird die SFD eingesetzt, da diese als Empfehlungen in der Literatur genannt werden. Welche Methoden setzen Sie bei der Nachhaltigkeitsbewertung von technischen Konzepten ein bzw. würden Sie hierfür empfehlen?

*A13: Keine Antwort*

**F14:** In der letzten Phase des SIA-DT Prozess (Phase 12) sollen die Nachhaltigkeitsdaten verwaltet und in ein kontinuierliches Monitoring für das mittlere und das Top Management überführt werden. Wie werden im Unternehmen / der Institution, bei der Sie arbeiten aktuell Nachhaltigkeitsdaten erhoben, gespeichert, verwaltet und für Entscheidungsträger aufbereitet bzw. welche Methoden schlagen Sie hier vor?

*A14: Ich kann nur über unsere Energy Sustainability sprechen. Für die Sustainability Abteilung gibt es eigene Softwarelösungen. Aktuell ist es so, dass all unsere Werke ihre Energieverbräuche monatlich berichten und wir die Verbräuche dann im Dashboard haben. Alle neuen Investitionsprojekte, die wir global durchführen, werden immer von der Energy Sustainability Abteilung freigegeben. Im Projektantrag werden immer Angaben zu Energie Aspekten angegeben. In der Zukunft wollen wir in Echtzeit sehen, wie viel Energie wir an welchen Standorten und Anlagen verbrauchen und Energie als Kennzahl bis zum Top Management bringen. Energie ist bei uns heute aber schon bonusrelevant. Die verbrauchte Energie pro kg produziertem Produkt ist eine Kennzahl für Supply Chain Managerin und Manager, der die Bonushöhe mitbestimmt.*

Quelle: Eigenerstellung

## Anhang 9: Antworten zum Experten/Expertinnen-Interview 2

<b>DATUM</b> 10.08.2023	<b>INTERVIEWER</b> Jannek Hündling	<b>INTERVIEW MIT</b> [Anonym]	<b>ROLLE:</b> Professur für nachhaltige Unternehmens- führung
----------------------------	---------------------------------------	----------------------------------	---

### ANMERKUNGEN

Zu Beginn der Interviews wird das Thema des Interviews motiviert, die Methodik der Forschungsarbeit besprochen und der im Rahmen der Masterthesis „Nachhaltigkeit in produzierenden Unternehmen durch Digitalisierung: Konzept zur Nutzung digitaler Technologien zur Erreichung und Verbesserung von Nachhaltigkeitszielen“ entwickelte SIA-DT Prozess (Sustainability Integrated Approach for Digital Technologies) vorgestellt. Dabei werden die Schritte, die im Rahmen der Forschungsarbeit durchgeführt werden, erklärt. Der Prozess wird den Teilnehmenden in graphischer Form präsentiert. Die Einführung in die Interviews soll auf max. 15 min beschränkt werden. Die Interviews sollen zur Evaluation und ggf. Anpassung des Prozesses genutzt werden. Dies wird den Teilnehmenden vor Beginn der Vorstellung mitgeteilt. Das Interview wird insgesamt ca. 45 Minuten dauern.

### ANONYMISIERUNG UND PSEUDONYMISIERUNG

Im Rahmen der Veröffentlichung der Masterthesis kann eine Pseudonymisierung oder Anonymisierung erfolgen: Die Präferenz des Teilnehmenden wird unten festgehalten.

- Keine Anonymisierung / Pseudonymisierung bei Veröffentlichung gefordert  
 Anonymisierung / Pseudonymisierung bei Veröffentlichung  
 Individuelle Absprache

### AUDIODATEN UND TRANSKRIPTION

Das Interview wird für eine Transkription aufgezeichnet. Die wichtigsten Antworten der Teilnehmenden werden den untenstehenden Fragen zugeordnet und dem Teilnehmenden schriftlich per E-Mail zur finalen Bestätigung der Aussagen zugesandt. Nach der Bestätigung und ggf. Anpassung der Zusammenschrift werden die Audioaufzeichnungen der Interviews umgehend vernichtet. Die Zusammenschrift der Interviews wird zusammen mit der Forschungsarbeit am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen planmäßig bis zum 06. November 2023 eingereicht und unterliegt ab diesem Zeitpunkt den Datenschutzregelungen der TU Darmstadt.

#### ALLGEMEIN [A]:

Allgemeines zur Person und zur Institution / zum Unternehmen

**F1:** Wie lautet Ihre aktuelle Positionsbezeichnung?

A1: Ich bin APL / Professorin an einer Universität in Deutschland.

**F2:** Wie lange sind Sie schon in Ihrer aktuellen Position tätig?

A2: Ich bin in dieser Position seit 13 Jahren tätig.

**F3:** Was ist das Kerngeschäft bzw. die Branche des Unternehmens / der Institution, bei der Sie tätig sind?

A3: Das Kerngeschäft der Universität ist die Forschung und Lehre.

#### UMWELTMANAGEMENT [U]:

**F1:** Welche Rahmenwerke und Standards sind besonders bedeutend für die Erreichung von Nachhaltigkeit in der Industrie?

Einbettung des SIA-DT  
(Sustainability Integrated Ap-  
proach for Digital Technolo-  
gies) Prozess in Management-  
systemen

*A1: Da hat sicherlich die Norm DIN EN ISO 14001 eine besonders große Rolle für Nachhaltigkeit. Ich glaube die Norm DIN EN 26000 ist nicht ganz so weit verbreitet. Was im Moment in fast allen Unternehmen Thema ist, ist die CSRD, das Lieferkettengesetz und die zukünftige europäische Richtlinie, die kommen wird. Auf Produkte bezogen wird auch die ISO-Norm für das Life Cycle Assessment genutzt. Vieles andere ist branchenabhängig. Ich glaube, dass für das Nachhaltigkeitsmanagement, nicht nur für die Berichterstattung, sondern auch für das Management selbst, tatsächlich die Berichtspflichten und die neuen Gesetze wie das Lieferkettengesetz, eine besonders große Rolle spielen. Die Normen sind für viele Unternehmen tägliches Geschäft und behalten weiterhin ihre Bedeutung. Durch die neuen gesetzlichen Entwicklungen verlieren sie nicht an Relevanz. Aber die neuen Anforderungen sind für viele Unternehmen ganz neu und viel umfassender. Diese sind jetzt plötzlich von sehr vielen Unternehmen gesetzlich verpflichtend einzuhalten. Und die Unternehmen, die gesetzlich an diese neuen Anforderungen gebunden sind, geben den Druck natürlich an ihre Zulieferer weiter. Dadurch sind die ganzen Anforderungen, die mit diesen Regularien verbunden sind, von europäischer Ebene kommend, im Moment das größte Thema in fast allen Unternehmen.*

**F2:** Welcher Bedeutung würden Sie Normen wie DIN EN ISO 14001, DIN EN ISO 26000 zu Umweltmanagementsystemen zuordnen?

*A2: Vergleiche A1.*

**F3:** Warum bedarf es neben diesen Normen weiterer Ansätze zur Systematisierung des nachhaltigen Managements wie der SBSC?

*A3: Das eine und das andere verfolgen oft jeweils ganz unterschiedliche Ziele. Also kann das eine unabhängig vom anderen ausgestaltet werden. Die Norm ISO 14001 für Managementsysteme gibt eine Art Leitfaden vor, wie im Unternehmen grundsätzlich vorgegangen werden kann, um bestimmte, selbst gesetzte Nachhaltigkeitsziele oder, in diesem Fall Umweltziele, erreichen zu können und diese systematische Fähigkeit gegebenenfalls dann zertifizieren lassen zu können. Konkrete Planungs- und Kontrollinstrumente wie eine Sustainability Balanced Scorecard oder andere Instrumente dienen dazu, bestimmte Ziele im Nachhaltigkeitsmanagement zu erreichen und die inhaltlichen Ausprägungen festzulegen. Die Norm schreibt vor, dass Unternehmen sich Ziele setzen müssen, und Maßnahmen, Verantwortlichkeiten sowie Mittel definieren und bereitstellen, um diese Ziele erreichen zu können. Bei der Sustainability Balanced Scorecard kann ein Unternehmen, wenn die SBSC denn sinnvoll angewendet wird, konkret festlegen, welche Ziele erreicht werden sollen; welche Kennzahlen hierzu herangezogen werden sollen und welche Instrumente und Maßnahmen anzuwenden und durchzuführen sind. Es sind keine Alternativen, sondern unterschiedliche Fragestellungen, die hier beantwortet werden.*

---

**F4:** Welche Nachhaltigkeitsrahmenwerke und Managementsysteme wie bspw. die DIN EN ISO 14001, DIN EN ISO 26000, SBSC etc., schätzen Sie als besonders geeignet für die Einbettung des vorgestellten SIA-DT ein?

*A4: Man kann den Prozess sicherlich sowohl in die ISO 14001 als auch in die Sustainability Balanced Scorecard einbetten. Auch die Sustainability Balanced Scorecard wird als Managementsystem bezeichnet. Insofern ist die SBSC ein Ansatz, der relativ umfassend eingesetzt werden kann. Ein Prozess, wie von Ihnen dargestellt, finde ich interessant und auch als Modell spannend und kann sicherlich gut von Unternehmen angewendet werden, die nach ISO 14001 ein Umweltmanagementsystem etabliert haben oder auch in Unternehmen, die nach der Sustainability Balanced Scorecard ein Managementsystem etabliert haben. Ich würde es nicht so sehen, dass das eine oder das andere einen solchen Prozess per se besser oder schlechter unterstützt. Am wichtigsten ist sicherlich, dass im Unternehmen ein systematisches Denken im Zusammenhang mit dem Thema Nachhaltigkeit vorliegt. Und dieses systematische Denken wird durch beide Ansätze gefördert. Im Hinblick auf die Bereitstellung von Ressourcen ist die ISO 14001 etwas geeigneter. Bei der Umsetzung der SBSC sind Unternehmen völlig frei und haben mehr Spielraum. Sie ist eigentlich ein völlig frei ausgestaltbares Instrument und besitzt wesentlich weniger konkrete Handlungsanleitungen als die Norm ISO 14001. Die Norm ISO 14001 definiert als Anforderung, dass die oberste Leitung entsprechende Ressourcen zur Verfügung stellen muss. Dies bezieht sich auf finanzielle Ressourcen, technologische und personenbezogene Ressourcen. Für die SBSC gibt es keine Norm, die ein übliches Vorgehen vorschreibt. Es gibt für die SBSC wesentlich weniger konkrete Handlungsanleitungen als für Managementsysteme nach ISO 14001. Dennoch gilt: Wenn die Scorecard und das zugrundeliegende System gut implementiert ist, heißt das auch, dass entsprechende Ressourcen zur Verfügung gestellt werden müssen. Es gibt zwar keinen Zertifizierungsprozess für die SBSC, aber wenn es richtig umgesetzt wird, gehört auch zu einem guten Management nach dem Sustainability Balanced Scorecard Ansatz, dass entsprechende Ressourcen zur Verfügung gestellt werden.*

**F5:** Welche Nachhaltigkeitssysteme werden in großen, mittleren und kleinen Unternehmen am häufigsten verwendet?

*A5: Sehr kleine Unternehmen haben relativ selten zertifizierte Managementsysteme, es sei denn, sie sind Zulieferer in der Automobil oder Maschinenbauindustrie, wo es in der Lieferkette gefordert wird. Es hängt hier stark ab von der Branche. Große Unternehmen haben in der Regel zertifizierte Management Systeme. Mittlere Unternehmen besitzen zertifizierte Managementsysteme in Abhängigkeit davon ob, andere Unternehmen in der Lieferkette den Einsatz von zertifizierten Managementsystemen verlangen. Große Unternehmen haben wahrscheinlich statistisch signifikant häufiger zertifizierte Management Systeme als kleine Unternehmen. Das zweite Kriterium, das entscheidend ist, ist die Branche.*

---

**F6:** Welche Umweltmanagementsysteme oder ähnliche Managementsysteme wie dem der DIN EN ISO 14001 oder 26000 werden im Unternehmen / an der Institution, an der Sie tätig sind, bereits eingesetzt?

*A6: Übersprungen.*

**F7:** Wie sind diese Managementsysteme in der Organisation des Unternehmens / der Institution verankert?

*A7: Übersprungen.*

**F8:** Wo liegen, bei aktuellen Standards und Rahmenwerken, die Schnittstellen zwischen den Digitalisierungsprozessen und den Nachhaltigkeitsmanagementprozessen?

*A8: Das ist glaube ich sehr unternehmensspezifisch. Ein Prozess, der natürlich immer stärker digitalisiert wird, ist die Dokumentation. Vor 20 bis 30 Jahren hatten viele Unternehmen dicke Ordner im Archiv, wo die Management Systeme dokumentiert wurden. Das finden Sie heute hoffentlich nirgendwo mehr. Diese Dokumentation ist heute digitalisiert. Inwiefern Unternehmen tatsächlich einzelne Prozesse wie die Erfassung von Umweltauswirkungen, die Bewertung von Umweltauswirkungen, das Verfolgen der Erfüllung oder der Umsetzung der Maßnahmen und die Erreichung der Ziele digital handhaben, ist sehr unterschiedlich. Es gibt Studien, die zeigen, dass im Nachhaltigkeitsmanagement von Unternehmen, gerade in KMU, sehr viel und teilweise sogar ausschließlich mit MS Excel gearbeitet wird. Nur bei einem relativ kleinen Anteil der KMU ist weitergehende Digitalisierung an der Tagesordnung. Da gibt es einen großen Nachholbedarf. Bei den großen Unternehmen sind diese Prozesse relativ weit digitalisiert. In den großen Unternehmen gibt es Tracking Systeme und E-Mail-Erinnerungen, wenn irgendwelche Maßnahmen nicht durchgeführt worden sind. Die reine Umsetzung der Managementsystem-Anforderungen ist in großen Unternehmen relativ stark digitalisiert. In KMU aber häufig noch relativ wenig. Das gilt allerdings erschreckenderweise auch für viele große Unternehmen. Insbesondere bei den mittelgroßen Unternehmen kann beobachtet werden, dass teilweise noch händisch abgewogen wird wie viele Abfälle angefallen sind und manuell berechnet wird, wie viel CO<sub>2</sub>-Emissionen oder Treibhausgasemissionen erzeugt worden sind. Selten werden dabei schon Datenbanken verwendet. Es gibt natürlich auch Vorreiter-Unternehmen, aber in der Breite gibt es einen großen Nachholbedarf bei der Verknüpfung von Digitalisierung und Umweltmanagement.*

**F9:** Welche Schnittstellen fehlen ggf. im SIA-DT noch?

*A9: Die Anbindung des (SIA-DT, Anm. d. Verf.) Prozesses an andere Abteilungen oder Schnittstellen wie bspw. das Reporting wäre wiederum ein eigener Prozess. Im Rahmen dieses neuen Prozesses würde man überlegen, nach welchen Standards die erhobenen Daten berichtet werden müssen. Die Daten müssen dann von der Abteilung, in der sie erhoben werden, eingepflegt werden. Ein weiterer angrenzender Prozess zu dem von Ihnen*



---

dargestellten (SIA-DT, Anm. d. Verf.) Prozess ist natürlich auch, wie mit den Informationen umgegangen wird. Gerade um die weiteren Verbesserungspotenziale zu nutzen und um den von Ihnen genannten kontinuierlichen Verbesserungsgedanken anzusprechen. In dem Beispiel, das Sie genannt haben (Beispiel: Roboterhund wird genutzt werden, um Mitarbeiter zu 95% aus Gefahrenbereichen zum Zeitpunkt einer Gefahr heraus zu halten, Anm. d. Verf.) haben Sie bspw. 95% angegeben. Im Rahmen der Verbesserung muss geprüft werden, ob die gesteckten Ziele damit erreicht sind oder möglicherweise in Zukunft das 99 % Ziel erreicht werden soll. Und zum ändern muss festgestellt werden, welches Ziel am Ende tatsächlich erreicht wurde. Das sind zwei verschiedene Aspekte. Die Berichterstattung hat dort erst einmal keine Aufgabe, weil diese nur berichtet, was am Jahresende passiert ist und wie der Stand der Dinge ist. Zukünftige Ziele werden auch definiert. Weitere Schnittstellen wären in den verschiedenen Entwicklungsabteilung und / oder Produktionsbereichen sowie den betroffenen Managementbereichen.

**F10:** Worauf muss bei der Integration des SIA-DT Prozesses in ein bestehendes Umwelt- bzw. Nachhaltigkeitsmanagementsystem geachtet werden?

*A10: Übersprungen.*

**F11:** Was sind die größten Hürden (organisatorisch, kulturell, managementbezogen, methodisch) bei der Integration des SIA-DT Prozesses in ein bestehendes Umwelt- bzw. Nachhaltigkeitsmanagementsystem?

*A11: Es hängt natürlich sehr vom Reifegrad des Unternehmens insgesamt ab. Wenn wir von einem Unternehmen sprechen, dass relativ IT getrieben ist und relativ IT nah ist, dann wird die Integration wahrscheinlich nicht sehr schwer. Wenn Sie ein Unternehmen haben, das jetzt insgesamt weniger IT getrieben ist, dann sind auch die kulturellen Hürden viel größer, einen Prozess wie den SIA-DT umzusetzen. Es hängt sehr stark damit zusammen, wie gut im Unternehmen Nachhaltigkeitsmanagement und auch die Digitalisierung etabliert sind und wie weit verbreitet in verschiedenen Bereichen im Unternehmen ein Verständnis (für Nachhaltigkeit durch Digitalisierung, Anm. d. Verf.) besteht und ob das Thema in der obersten Leitung in einer Art und Weise integriert ist, die eine entsprechende Unterstützung bedingt. Wenn der Prozess ohne wirkliche Unterstützung der obersten Leitung implementiert werden soll, dann wird das scheitern. Aber das gilt allgemein für Umweltmanagementsysteme. Kein Umweltmanagementsystem wird erfolgreich im Unternehmen etabliert werden können, wenn die oberste Leitung nicht dahintersteht. Also insofern sind sicherlich Hürden bei der Frage der Relevanz des Themas und der Verteilung von Budgets. Wenn Sie in diesen Prozess Budget investieren, fehlt das Budget unter Umständen an anderer Stelle. Das kann zu Problemen führen. Im Hinblick auf kulturelle Hürden ist es sicherlich die Frage, wie weit das Denken in technologiegetriebener Verbesserung im Unternehmen etabliert ist, die*

---

den Unterschied macht. Wie weit das Thema Nachhaltigkeit allgemein im Unternehmen etabliert ist, ist ebenfalls bedeutend.

**F12:** Denken Sie das die Implementierung des SIA-DT Prozesses in der Industrie Potenzial hätte, die Umweltleistung bzw. Nachhaltigkeit auf Unternehmensebene zu verbessern?

*A12: Wenn der (SIA-DT, Anm. d. Verf.) Prozess gut umgesetzt wird dann ist er sicherlich nützlich, da er die Verteilung von Budget begründet in Nachhaltigkeitsthemen hineinfließen lässt. Das wäre sicherlich eine Hilfe für Unternehmen.*

**F13:** Welche Anreize für Unternehmen müssten geschaffen werden, den SIA-DT Prozess zu integrieren?

*A13: Die Frage ist für den Prozess konkret schwer zu beantworten. Für das Nachhaltigkeitsmanagement allgemein gibt es klassische Treiber. Das sind zum einen Regularien. Unternehmen, die unter die CSRD fallen und danach berichten müssen, können diese Aufgaben nicht mehr händisch durchführen. Die Informationen, die berichtet werden müssen, sind so vielfältig, dass man ohne Digitalisierung den Anforderungen nicht gerecht werden kann. Je größer das Unternehmen ist, umso weniger können die Anforderungen, ohne Digitalisierung, eingehalten werden. Aber auch bei den kleineren Unternehmen oder den mittelgroßen Unternehmen wird es schwierig die Anforderungen ohne digitale Lösungen einzuhalten. Das heißt, dass die Regularien an die Berichterstattung aber natürlich auch die Anforderungen weiterer Regularien die materieller sind und nicht auf die Berichterstattung ausgerichtet sind, in der Zukunft zu einer stärkeren Digitalisierung führen werden. Auch damit zusammenhängend, dass die Berichterstattung zum Teil digital erfolgen muss und dafür eine entsprechende digitale Datenaufbereitung erforderlich ist. Das gilt auch für das Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz. Auch das wird dazu führen, dass die Anforderungen an die Menge der Daten, an die Zuverlässigkeit der Daten und die Verknüpfung der Daten des Unternehmens mit den Daten der Lieferkette besser integriert wird. Die Anforderungen durch Regularien erzeugen einen so hohen Druck auf Unternehmen, dass dies einfach ein starker Treiber der Digitalisierung wird. Es ist nicht verwunderlich, dass im Moment viele Startups, die in diesem Bereich Dienstleistungen anbieten, gegründet werden. Ein zweiter wichtiger Anreiz sind die gestiegenen Kundenanforderungen. Dieser Punkt hängt eng mit dem ersten Punkt, den Regularien, zusammen. Auch moralische Gründe kommen in Frage. In dem Moment, wo ein Unternehmen erkennt, dass es einen wesentlichen Beitrag zum Umweltschutz leisten kann, wird es für Unternehmen interessant sich mit Nachhaltigkeit zu beschäftigen. Das wird wahrscheinlich erfordern, dass man auch in dem Bereich der Nachhaltigkeit eine stärkere Digitalisierung umsetzt, um allen Stakeholder-Anforderungen und den intrinsischen Motiven gerecht zu werden. Die Vielfalt an Daten, die im Zusammenhang mit den Anforderungen entsteht, ist nur digital in den Griff zu bekommen.*

## IMPLEMENTIERUNG [I]

Erweiterung des prozessualen Ansatzes DMME für die Implementierung der Technologien

**F9:** Welche Faktoren könnten die Skalierbarkeit des SIA-DT Prozesses beeinflussen?

*A9: Wahrscheinlich ist der Prozess skalierbar. Bei größeren Unternehmen kann der Prozess bei Nachhaltigkeitsprojekten eingesetzt werden da er hinreichend generisch ist, um sehr unterschiedliche ökologische und soziale Verbesserungsprojekte abbilden zu können. Ich vermute, dass der Prozess in sehr kleinen Unternehmen eher weniger einfach anwendbar sein wird und daher dort auch nicht skaliert werden kann. Es sei denn man würde den Prozess und die benötigten Ressourcen minimieren. Die Schwierigkeit liegt dann aber darin, dass ich die Kernelemente des Konzepts beibehalte. In großen Unternehmen müsste man schauen, ob man für die unterschiedlichen sozialen und ökologischen Projekte, Prozessabwandlungen differenziert, weil diese Projekte durchaus recht unterschiedliche Anforderungen stellen. Ob man bei der technischen Implementierung für diese unterschiedlichen Anforderungen einen Standardprozess nutzen kann, ist für mich schwer einzuschätzen.*

**F10:** Nach Ihrer Expertise: Welches Vorgehen würden Sie empfehlen, um den SIA-DT neben den durchgeführten Experteninterviews auf Anwendbarkeit, Verständlichkeit und Nutzen zu evaluieren?

*A10: Eine groß angelegte Befragung können Sie hierfür nicht durchführen. Für dieses spezielle Thema ist einfach noch kein breites Verständnis vorhanden. Sie würden dort zu wenige Antworten bekommen, die Sie auswerten können. Was mehr Sinn macht, ist die Anwendung des Prozesses als Use Case in Unternehmen. Auf der Basis des Use Case können Sie dann noch einmal Experteninterviews anschließen. Ich glaube, dass die Anwendung in konkreten Unternehmen und Fallbeispielen tatsächlich das beste Vorgehen wäre.*

**F11:** In der strategischen Nachhaltigkeitsreifegradbewertung (SIA-DT Phase 1) werden Reifegradmodelle eingesetzt, da diese als Empfehlungen in der Literatur genannt werden. Welche Methoden setzen Sie bei der strategischen Nachhaltigkeitsbewertung ein bzw. würden Sie hierfür empfehlen?

*A11: Reifegradmodelle anzuwenden macht Sinn. Ich denke unter dem Begriff Reifegrad Modell kann man alle Methoden sammeln, die bei der Identifizierung von Nachhaltigkeitsstellhebeln genutzt werden können. Neben dem Reifegradmodell kann genauso gut ein Punktwert Modell oder eine ABC-Analyse durchgeführt werden. Ich glaube die Begrifflichkeit des Reifegradmodells ist letztlich sekundär. Denn bei all den genannten Modellen wird ein ähnliches Ziel verfolgt. Die SWOT-Analyse wäre sicherlich ebenfalls ein Modell, das sinnvoll angewendet werden kann.*

**F12:** In der Nachhaltigkeits- und Risikobewertung (SIA-DT Phase 6) der möglichen Technologieoptionen wird die LCA eingesetzt, da diese als Empfehlung in der Literatur genannt wird. Welche Methoden setzen Sie bei der Nachhaltigkeitsbewertung von

---

Produkten, Prozessen und Technologien ein bzw. würden Sie hierfür empfehlen?

*A12: Die LCA ist eine sehr detaillierte Methode. Sie ist nicht dazu geeignet eine grobe Abschätzung zu treffen, sondern kann erst dann eingesetzt werden, wenn umfassende Daten vorliegen.*

**F13:** In der detaillierten technischen und nachhaltigkeitsbezogenen Bewertung des technischen Konzepts (SIA-DT Phase 9) der ausgewählten Technologie wird die SFD eingesetzt, da diese als Empfehlung in der Literatur genannt wird. Welche Methoden setzen Sie bei der Nachhaltigkeitsbewertung von technischen Konzepten ein bzw. würden Sie hierfür empfehlen?

*A13: Wenn in dieser Phase konkrete Daten vorliegen dann können die SBSC und die LCA gut eingesetzt werden.*

**F14:** In der letzten Phase des SIA-DT Prozesses (Phase 12) sollen die Nachhaltigkeitsdaten verwaltet und in ein kontinuierliches Monitoring für das mittlere und das Top Management überführt werden. Wie werden im Unternehmen / der Institution, bei der Sie arbeiten aktuell Nachhaltigkeitsdaten erhoben, gespeichert, verwaltet und für Entscheidungsträger aufbereitet bzw. welche Methoden schlagen Sie hier vor?

*A14: Es gibt hierfür unterschiedliche Modelle. Wichtig ist vor allem die Frage: Wofür müssen die Daten aufbereitet werden? Will ich dem Vorstand zeigen, wie erfolgreich das Projekt ist? Will ich den Vorstand von neuen Projekten überzeugen? Geht es um die Erfüllung von internen oder externen Berichtspflichten? Dafür gibt es in Unternehmen mit Sicherheit standardisierte Modelle. Zum Beispiel die Scorecards, die von Unternehmen entwickelt worden sind, um die Zusammenhänge in den Daten darzustellen. Von Branche zu Branche und von Unternehmen zu Unternehmen können diese Standards aber sehr unterschiedlich sein. Die Rückführung der Daten an den Vorstand ist nicht willkürlich, sondern erfolgt in möglichst übersichtlicher Art und Weise. Auch Ampelsysteme für Fortschrittsbeurteilungen und andere Modelle eignen sich für die Darstellung. Die meisten großen Unternehmen wenden solche Werkzeuge an. Inwieweit es darüber hinaus Standards gibt, gerade auch bei der technischen Implementierung, ist für mich schwer abzuschätzen. Wie wir die Daten automatisiert in die unternehmensspezifischen Modelle der Unternehmen überführen ist das Geschäftsmodell der Startups, von denen wir eben gesprochen haben. Auch bestehende Anbieter wie die SAP, entwickeln gerade Weiterentwicklungen der Software, um eben genau solche Dinge durchführen zu können. Das kann auch über Unternehmensgrenzen hinaus gehen. In den nächsten Jahren wird sich in dem Bereich sehr viel entwickeln.*

**F15:** Denken Sie, dass der PDCA-Zyklus in den einzelnen Phasen genutzt werden kann, um eine kontinuierliche Verbesserung des SIA-DT zu erreichen?

*A15: Ich denke nicht, dass es der PDCA-Zyklus ist, der in jeder Phase durchlaufen wird. Beim PDCA-Zyklus gibt es genau*

---

*definierte Aufgaben, die in den vier Phasen des Zyklus zu erledigen sind. In der Planungsphase geht es darum Ziele festzulegen, Anforderungen zu erkennen und Maßnahmen zu planen. Es wird bewertet, welche gesetzlichen Vorgaben eine Rolle spielen. Dann gibt es die Do-Phase, also die Phase in der entsprechende Ressourcen bereitgestellt werden müssen, um geplante Maßnahmen durchführen zu können. Folgend wird in der Check-Phase geprüft, wie diese Maßnahmen umgesetzt wurden und was diese erreicht haben. Im vierten Schritt geht es in die Verbesserung und die Erfassung der Erkenntnisse aus Maßnahmen, die nicht gut gelaufen sind. Diese Schritte kann man natürlich für jeden Prozess durchführen. Der PDCA-Zyklus ist nicht ISO 14001 spezifisch, sondern eigentlich eine Vorgehensweise die viele verschiedene Normen, sei es jetzt die Qualitätsmanagement Norm, Umweltmanagement Normen, Energiemanagement Normen oder die Gesundheitsmanagement Normen nutzen und jeweils unterschiedliche Anforderungen inhaltlicher Art an die vier Phasen des Zyklus stellen. Ein integriertes Managementsystem würde dann versuchen, all die verschiedenen Anforderungen zu erfüllen. Dieses Denken kann ich natürlich überall anwenden. Der PDCA-Zyklus ist inhaltlich völlig losgelöst von der eigentlichen Fragestellung, die ich betrachte. PDCA ist grundsätzlich ein einfach anzuwendendes Konzept. Ich plane erst, führe durch und überprüfe, wie der Plan umgesetzt worden ist. Im Anschluss bessere ich ggf. nach. Wenn wir die ISO 14001 betrachten, insbesondere welche Anforderungen hier jeweils gestellt werden, dann sind es ganz konkrete inhaltliche Aspekte. Und die finde ich in den Phasen des von Ihnen vorgestellten SIA-DT Prozess in einer sehr unterschiedlichen Ausprägung wieder. In den Phasen Ihres Prozesses wird das Vorgehen nach dem PDCA-Zyklus nicht deutlich. Ich erkenne hier vielmehr einen typischen Stage Gate Prozess aus dem Innovationsmanagement mit den typischen Nachbesserungsschleifen bzw. Verbesserungsschleifen.*

Quelle: Eigenerstellung

## Anhang 10: Antworten zum Experten/Expertinnen-Interview 3

<b>DATUM</b> 09.08.2023	<b>INTERVIEWER</b> Jannek Hündling	<b>INTERVIEW MIT:</b> [Anonym]	<b>ROLLE:</b> Manager of Engineering Smart Factory Initiative
----------------------------	---------------------------------------	-----------------------------------	---

### ANMERKUNGEN

Zu Beginn der Interviews wird das Thema des Interviews motiviert, die Methodik der Forschungsarbeit besprochen und der im Rahmen der Masterthesis „Nachhaltigkeit in produzierenden Unternehmen durch Digitalisierung: Konzept zur Nutzung digitaler Technologien zur Erreichung und Verbesserung von Nachhaltigkeitszielen“ entwickelte SIA-DT Prozess (Sustainability Integrated Approach for Digital Technologies) vorgestellt. Dabei werden die Schritte, die im Rahmen der Forschungsarbeit durchgeführt werden, erklärt. Der Prozess wird den Teilnehmenden in graphischer Form präsentiert. Die Einführung in die Interviews soll auf max. 15 min beschränkt werden. Die Interviews sollen zur Evaluation und ggf. Anpassung des Prozesses genutzt werden. Dies wird den Teilnehmenden vor Beginn der Vorstellung mitgeteilt. Das Interview wird insgesamt ca. 45 Minuten dauern.

### ANONYMISIERUNG UND PSEUDONYMISIERUNG

Im Rahmen der Veröffentlichung der Masterthesis kann eine Pseudonymisierung oder Anonymisierung erfolgen: Die Präferenz des Teilnehmenden wird unten festgehalten.

- Keine Anonymisierung / Pseudonymisierung bei Veröffentlichung gefordert  
 Anonymisierung / Pseudonymisierung bei Veröffentlichung  
 Individuelle Absprache

### AUDIODATEN UND TRANSKRIPTION

Das Interview wird für eine Transkription aufgezeichnet. Die wichtigsten Antworten der Teilnehmenden werden den untenstehenden Fragen zugeordnet und dem Teilnehmenden schriftlich per E-Mail zur finalen Bestätigung der Aussagen zugesandt. Nach der Bestätigung und ggf. Anpassung der Zusammenschrift werden die Audioaufzeichnungen der Interviews umgehend vernichtet. Die Zusammenschrift der Interviews wird zusammen mit der Forschungsarbeit am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen planmäßig bis zum 06. November 2023 eingereicht und unterliegt ab diesem Zeitpunkt den Datenschutzregelungen der TU Darmstadt.

### ALLGEMEIN [A]:

Allgemeines zur Person und zur Institution / zum Unternehmen

**F1:** Wie lautet Ihre aktuelle Positionsbezeichnung?

**A1:** Manager of Engineering für die deutschlandweite Smart Factory Initiative.

**F2:** Wie lange sind Sie schon in Ihrer aktuellen Position tätig?

**A2:** Als Wirtschaftsingenieur bin ich seit 8 Jahren tätig und in der Position Manager Engineering für unsere deutschlandweite Smart Factory Initiative jetzt seit 2 Jahren.

**F3:** Was ist das Kerngeschäft bzw. die Branche des Unternehmens / der Institution, bei der Sie tätig sind?

### STELLHEBEL [S]:

Shop-Floor Stellhebel in Industrie-Unternehmen zur Erhöhung der Nachhaltigkeit durch digitale Technologien

A3: Das Unternehmen beschäftigt sich mit der Herstellung von Werkzeugen für die Metallzerspanung und mit dem Herstellen von Verschleißteilen für Prozess Industrien. Es werden auch Hartmetallwerkzeuge für die Bauindustrie hergestellt. Hier ist insbesondere der Straßenbau ein wichtiger Kunde.

**F1.1:** Sind Ihrer Erfahrung nach, die digitalen Technologien wichtig, um Nachhaltigkeitsziele wie bspw. den Ressourcenverbrauch, Emissionen durch Prozesse und Produkte oder die Zufriedenheit der Mitarbeitenden in der Produktion zu optimieren?

A1.1: Ja, absolut. Beide Themen sind verhältnismäßig neu in der Industrie und lösen ein konventionelles Bild ab, was die Industrie lange Zeit geprägt hat. Von daher ist es natürlich von Vorteil, wenn beide Themen, Nachhaltigkeit und Digitalisierung, Hand in Hand auftreten. Ich würde nicht sagen, dass das eine nicht ohne das andere kann, aber die Synergieeffekte müssen genutzt werden, um die vollen Potenziale auszuschöpfen. Hierfür gibt es gute Beispiele. Man denke an sämtliche IoT Lösungen, die heute in der Industrie eingesetzt werden. Mit diesem neuen Werkzeug-Satz der digitalen Technologien gibt es zahlreiche neue Möglichkeiten zur Optimierung der Produktion. Dieser neuer Werkzeug-Satz wird für die Beantwortung von Nachhaltigkeitsfragen und für das Lösen von Problemen im Kontext der Nachhaltigkeit genutzt. Beides geht Hand in Hand. Digitalisierung wird Nachhaltigkeit unterstützen.

**F1.2:** In welchen Bereichen der Produktion sind digitale Technologien Ihrer Meinung nach, besonders wichtig? (wenn F1.1 befürwortet wird)

A1.2: Das hängt natürlich davon ab, was man als neue digitale Technologien definiert und welche Technologien heute schon de facto Standards der modernen Fertigung sind. Grundsätzlich sind die neuen Technologien natürlich immer dort im Einsatz, wo der Hauptanteil der Wertschöpfung geschieht und in diesen Bereichen werden die Technologien auch als erstes implementiert. In angrenzenden Servicebereichen wie der Instandhaltung, dem Einkauf oder der HR werden diese Technologien früher oder später ebenfalls Einzug halten aber Stand jetzt, so zu mindestens bei uns im Unternehmen, konzentriert sich der Einsatz der neusten Technologien auf die Zerspanung und andere besonders wertschöpfende Prozesse.

**F1.3:** Welche Bereiche sind in Ihrem Unternehmen entscheidende Stellhebel bzw. Treiber für die Erreichung von Nachhaltigkeit?

A1.3: Ein wichtiger Treiber sind die Energiekosten. Am Fertigungsstandort Europa und speziell in Deutschland sind die Energiekosten und alle daraus abgeleiteten Werte der größte Treiber. Demnach sind alle Strom konsumierende Prozesse, wie bspw. die Medienversorgung, ein wichtiger Bereich. Druck-Luft ist für uns ebenfalls ein bedeutendes Thema. Je nachdem wie diese generiert wird, haben wir hier Leistungsverluste. Hier hängt es

---

*entscheidend von der Effizienz der Infrastruktur bzw. dem Anlagenpark ab. Ich denke auch an Kühl-Schmierstoffe wie dem Öl-Kreislauf, den wir in der Fertigung nutzen. Auch die Bereitstellung von Prozessgasen ist wichtig. Die Bereitstellung und Nutzung von Ressourcen sind für uns damit ein weiterer wichtiger Treiber. Last but not least: Die eigentlichen Rohstoff-Verbräuche sind ebenfalls treibend.*

**F2:** Welche spezifischen digitalen Technologien wie bspw. KI, IoT, Robotics, Big Data, Cloud Computing, AR, VR und 3D-Printing haben sich in Ihrem Unternehmen als besonders wirksam erwiesen um die Leistung und Nachhaltigkeit im Unternehmen / der Institution, an der Sie tätig sind zu steigern?

*A2: Hauptsächlich wenden wir uns den IoT Use Cases zu. Wir wollen die Fragen beantworten: Wie können wir aus unseren verknüpften Anlagen Daten schöpfen und diese durch Verknüpfung mit unseren IT-Systemen anreichern, um damit Probleme in der Fertigung zu lösen. Wir folgen einem sehr anwendungsorientierten Ansatz. Wir stellen uns die Fragen: Was benötigen die Mitarbeitenden bzw. die User? Was braucht die Abteilungsleitung und was braucht die Werksleitung in der täglichen Arbeit bzw. den Prozessen an denen diese täglich partizipieren und welche Probleme treten in diesen Prozessen auf? Genau diese Probleme versuchen wir mit den Technologien zu lösen. Dieses Vorgehen nutzen wir, um den Startpunkt zu setzen. Sprich: Um im Change-Management Prozess den ersten Schritt zu gehen und die Mitarbeitenden mitzunehmen und einzubinden. Es ist nicht sinnvoll die User einfach mit neuen Technologien zu konfrontieren, ohne den Nutzen im Alltag darzustellen. Wir digitalisieren aber auch an Stellen die aktuell nicht als Problem wahrgenommen werden, da es oftmals zum Problem der Betriebsblindheit kommt. Insbesondere langjährige Betriebszugehörige haben sich an bestimmte Prozesse gewöhnt und erkennen Potenziale möglicherweise nicht. Hier kann die Rolle des Digitalisierungsmanagement Objektivität einbringen. Zurzeit nutzen wir Technologien wie den 3D-Druck. Wir nutzen auch Augmented Reality. Machine Learning wird aktuell nur in ausgewählten Bereichen eingesetzt. Bei uns ist Machine Learning noch keine breit eingesetzte Technologie.*

**F3.1:** Welchen der Technologien KI, IoT, Robotics, Big Data, Cloud Computing, AR, VR und 3D-Printing oder der in F2 genannten Technologien würden Sie die insgesamt höchste Bedeutung zuordnen, wenn es um die Erreichung einer nachhaltigen produzierenden Industrie geht?

*A3.1: Ich würde nicht sagen, dass es eine Technologie gibt, welche die Hauptlast trägt und den größten Effekt bringt. Das ist bedingt durch die Vielfältigkeit der Technologielandschaft im Unternehmen. Über die Heterogenität der verschiedenen Produktionsprozesse, wird immer ein Mix aus verschiedenen Technologien im Mittelpunkt stehen. Langfristig wird der Fokus auf die Echtzeit-Datenanalyse in der Fertigung durch Machine Learning und leistungsstarke Cloud und Edge Computing gesetzt. Dadurch*



erreichen wir effizienter und intelligenter steuerbare Prozesse. Auch die Planbarkeit der Prozesse soll verbessert werden. Auf dem Weg müssen wir viele Schritte gehen. Der Fokus auf Machine Learning in der Kombination mit Cloud und Edge Computing wird die Effizienz in den Fertigungsprozessen und unsere Nachhaltigkeitsziele direkt beeinflussen. Man denke nur an die intelligente Steuerung von verschiedenen Medienströmen oder das intelligente Abschalten von Maschinen und anderen Verbrauchern in Fertigungshallen. Besonders wichtig sind auch die Verknüpfungen und Schnittstellen. Da eine leistungsfähige Datenaufnahme durch diese ermöglicht wird. Diese Daten dürfen nicht nur remote für Projekte, wie bspw. Optimierungsaufgaben, genutzt werden, sondern müssen auch direkt in den Steuerungskreislauf integriert werden, um das volle Potenzial auszuschöpfen. Dafür braucht es Edge und Cloud Computing sowie KI-Algorithmen. Die Verknüpfung verschiedener Technologien ist demnach der Schlüssel zum Erfolg. Die eine Technologie bedingt und ermöglicht dabei die andere Technologie. Man braucht hardwareseitig die Infrastruktur, die Sensorik und man benötigt Datenbanken, um die Daten zu speichern. Auf der Softwareseite, wenn wir uns in der IT befinden, braucht man Big Data und Algorithmen, die mit den Daten arbeiten können, um diese letztlich wieder in die Operational Technology zurückzuspiegeln.

**F3.2:** Welche Technologie hat für die Erreichung einer sozialen Nachhaltigkeit in der Industrie die größte Bedeutung?

A3.2: *Vergleiche A3.1.*

**F3.3:** Welche Technologie hat für die Erreichung einer ökonomischen Nachhaltigkeit in der Industrie die größte Bedeutung?

A3.3: *Vergleiche A3.1.*

**F3.4:** Welche Technologie hat für die Erreichung einer ökologischen Nachhaltigkeit in der Industrie die größte Bedeutung?

A3.4: *Vergleiche A3.1.*

## CASES [C]

Aktueller Einsatz digitaler Technologien in der Fertigung

**F1:** Haben Sie aktuelle oder bereits beendete Projektbeispiele dafür, wie der Einsatz von digitalen Technologien in Ihrem Arbeitsumfeld zur Erreichung eines ökologischen, ökonomischen oder sozialen Nachhaltigkeitsziels beigetragen hat?

A1: *Aktuell implementieren wir das Industrial IoT und Machine Learning im Rahmen einer Predictive Maintenance Anwendung. Die Problematik, die sich gestellt hat, waren ausfallende Ventilatoren an Sinteröfen, die zu einer längeren Abkühlzeit geführt haben. Um die fertigen Teile aus dem Ofen zu entnehmen, muss die Temperatur stark reduziert werden. Dafür wird Gas in die Öfen eingeleitet, welches die Wärme besser abtransportieren kann. Je mehr Ventilatoren hierbei im Einsatz sind, desto schneller kann die Abkühlung erreicht werden. Die Lüfter fallen am Ende ihrer Lebenszeit einfach aus. Dadurch verlängerten sich der Abkühlprozess und die Mitarbeitenden mussten länger warten. Vorgegebene Zeiten konnten nicht mehr eingehalten werden. Diese Ausfälle führen im Rückschluss dann zu einer falschen Planung. Wir*

---

*haben diese Lüfter mit Vibrationssensoren ausgestattet, um das Frequenzprofil der Vibration zu erfassen. Das Profil verändert sich über die Zeit und kann mit Machine Learning vorhergesagt werden. Das ermöglicht uns Vorhersagen über das baldige Ausfallen zu treffen, sobald der Lüfter bestimmte Grenzwerte überschreitet. So sind wir in der Lage, automatisiert eine Entscheidung zu generieren, welche Lüfter geprüft werden und im Ernstfall ausgetauscht werden müssen. Damit können wir das Problem beheben und längere Abkühlzeiten verhindern.*

**F2:** Welche Schritte wurden bei der Implementierung durchlaufen? (Wenn **F1** mit Ja beantwortet wurde)

*A2: Wir verfolgen während der gesamten Implementierung einen nutzungsorientierten Ansatz. Es geht immer los mit einem identifizierten Pain Point. Ist dieser groß genug, dass man das Problem lösen möchte und ist es für das Werk und die Werksleitung interessant das dieses Problem gelöst wird, dann wird das Digitalisierungsprojekt gestartet. Vorher müssen aber die Fragen beantwortet werden: Ist die digitale Lösung für das Problem eine nice-to-have Lösung oder ist sie essenziell und auf mehrere Maschinen skalierbar? Als erstes wird dabei immer auf Effizienzziele, Produktionsziele und Nachhaltigkeitsziele geschaut und bewertet, ob die Implementierung der digitalen Lösung diese Ziele unterstützt. Wenn dieses Kriterium erfüllt ist, untersuchen wir den Business Case. In dieser Phase möchten wir Antworten zu Fragen finden wie: Was wollen wir lösen? Wie kann das Problem Statement definiert werden und welche Technologien können wir einsetzen, um dieses Problem zu lösen? Wie viele Ressourcen stehen hierfür zur Verfügung und ist die Technologie skalierbar? Wenn wir herausfinden, dass das Problem, das wir lösen wollen, nur eine Anlage betrifft, setzen wir den Implementierungsprozess in der Regel nicht fort. Für einzelne Mitarbeitende verändert dies natürlich nichts. Diese werden immer noch mit dem Problem konfrontiert sein. Für den Einzelnen macht es keinen Unterschied, ob dieser mit dem Problem allein ist oder auch 10 andere Mitarbeitende mit diesem Problem umgehen müssen. Für das Digitalisierungsprojekt macht es aber einen großen Unterschied. Aus der Digitalisierungssicht ist es für uns nicht sinnvoll ein Implementierungsprojekt weiterzuführen, wenn wir die Ergebnisse nicht auf andere Prozesse übertragen können. Welche Projekte wir weiterführen ist auch im Bezug zur internen Ressourcenverteilung ein wichtiges Kriterium. Nach diesen Schritten geht es dann um andere Punkte wie die Datenanalyse, die Daten-Aufbereitung, das Daten-Cleaning und die Bewertung ob überhaupt genug Daten vorliegen oder weitere Sensoren eingesetzt werden müssen. In dem spezifischen Fall der ausfallenden Lüfter, ist dies der Fall gewesen. Häufig reichen aber die Maschinen-Signale, die wir aus den Maschinen über OPC-UA oder ähnliche Schnittstellen erhalten, bereits aus. Wenn diese Vorbereitungsphase durchlaufen ist, werden die eigentlichen Modelle erstellt. Danach werden die Modelle an den Datenfluss angeschlossen. Wir versuchen dabei einen Minimal Viable Product*

*Ansatz zu gehen, um die entwickelte Lösung so schnell wie möglich an die anwendenden User zu bringen und den Mitarbeitenden so schnell wie möglich einen direkten Mehrwert zu bieten. Dabei meine ich keinen Mock-up, sondern eine erste nutzbare Instanz der Lösung die wir später skaliert einsetzen. Durch dieses Vorgehen bekommen wir direktes User-Feedback schon vor dem Rollout. Während der Entwicklung können wir somit noch einen anderen Weg einschlagen, wenn wir feststellen, dass die Lösung das Problem nicht optimal lösen kann. Dieses agile Vorgehen bringt für uns die besten Ergebnisse. Gerade wenn bei den Mitarbeitenden wenig Erfahrung und Vertrauen im Bezug zu Maschine Learning Modellen vorhanden ist, kann eine fehlende Einbindung der User bewirken, dass sich diese gegen das Projekt bewegen. Das würde das Projekt zum Scheitern verurteilen. Wir haben festgestellt, dass wir mit dem Minimal Viable Product Ansatz die Stakeholder bei der Entwicklung der digitalen Lösung eng mit einbinden können und die Akzeptanz gegenüber der Technologie sichern.*

**F3:** Welche weiteren oder zukünftigen Anwendungsfälle für digitale Technologien zur Steigerung der Nachhaltigkeit sehen Sie im Unternehmen / in der Institution, bei der Sie tätig sind?

*A3: Übersprungen.*

**F4:** Welche Zusammensetzung hatte das Projektteam bei diesen Projekten? (Wenn **F1** mit Beispielen beantwortet wird)

*A4: Das war eine Vielzahl an Personen, die bei diesem Projekt involviert waren. Zuallererst natürlich die Fertigung. Als Prozess Experte hat die Instandhaltung mitgewirkt. Das Data Analytics Team hat mitgewirkt und die Hauptlast bei der Datenanalyse und der Entwicklung des Machine Learning Modells getragen. Auch unsere IT-Abteilung hat mitgewirkt und daran gearbeitet, wie automatisiert in der Instandhaltungssoftware ein Signal erstellt werden kann. Dieses Signal basiert dabei auf dem entwickelten Maschine Learning Modell. Das Modell besitzt die Fähigkeit das Signal auszulösen.*

## **SYSTEMATISIERUNG [SY]**

Systematisierung eines Einsatzes digitaler Technologien zur Nachhaltigkeitserreichung

**F1:** Wie würden Sie den Einfluss eines praxis- und management-orientierten Ansatzes wie dem SIA-DT Prozessmodell, für die Systematisierung der Erreichung von Nachhaltigkeit in der Industrie einschätzen?

*A1: Ja, der vorgestellte (SIA-DT, Anm. d. Verf.) Prozess macht Sinn. Firmen sind heute gezwungen, sich mit dem Thema Nachhaltigkeit zu beschäftigen, aus vielerlei Gründen. Von der unbestrittenen moralischen Verpflichtung mal abgesehen, gibt es viele wirtschaftliche Kriterien, sich mit dem Thema Nachhaltigkeit zu beschäftigen. Die Frage, die sich hier stellt, ist: Wie kann man den Ansatz umsetzen und einbinden? Wie bereits erwähnt sind beide Themen Digitalisierung und Nachhaltigkeit noch relativ jung im produzierenden Gewerbe. Daher ist es gut, wenn beides Hand in Hand auftritt. Die Idee, dass man Prozess-Ansätze aus der Digitalisierung nimmt, wie den CRISP-DM oder den DMME Prozess und*

---

*um Nachhaltigkeitsaspekte erweitert, so dass beide Themengebiete gemeinsam auftreten, ist sehr sinnvoll. Das Vorgehen hat auch den Charme, dass man bei Digitalisierungsprojekten und dem Ausrollen von digitalen Lösungen, den Fertigungsprozess, den man optimieren will, untersuchen und analysieren muss, um überhaupt zu verstehen und zu begreifen, wo man ansetzen kann, welche Interaktionen zu anderen Prozessen bestehen und wo die Daten fließen. Dafür ist ein prozessualer Ansatz gut geeignet. Dieses Prozesswissen sollte man unbedingt nutzen, um auch Nachhaltigkeit bei der Digitalisierung zu integrieren. Die wichtigsten Einflussfaktoren für eine positive Nachhaltigkeitsentwicklung, wurden auch in der Vergangenheit schon untersucht. Nur das Bewusstsein, welchen Einfluss man mit digitalen Technologien erreichen kann, hat aber noch gefehlt. Energieverbräuche und Medieninspeisungen zum Beispiel, werden schon lange optimiert, doch mit einem strukturierten Prozessansatz gewinnt man die Möglichkeit dieses Wissen als Nachhaltigkeitstreiber in den Digitalisierungsprozess, der ohnehin schon auf die Optimierung der Effizienz ausgerichtet ist, zu integrieren.*

**F2:** Sind Sie der Meinung, dass in Ihrem aktuellen Arbeitsumfeld ein Standard für das nachhaltigkeitsintegrierte Management von Digitalisierungsprojekten die Nachhaltigkeit des Unternehmens verbessern, verschlechtern oder nicht beeinflussen würde?

*F2: Übersprungen.*

**F3:** Gibt es für Digitalisierungsprojekte in Ihrem Unternehmen / an Ihrer Institution bereits einen Standard-Prozess welcher Nachhaltigkeitsziele bei der Planung sowie der Implementierung von digitalen Technologien integriert?

*A3: Nein.*

**F4:** Würden Sie einige Phasen des Unternehmens-Standards in Ihrem Unternehmen zu den Phasen des SIA-DT ergänzen und wenn Ja, welche Phasen / Gates des Standards würden Sie zum SIA-DT ergänzen?

*A4: Vergleiche A3.*

**F5:** Welche organisatorischen, prozessualen und ggf. unternehmenskulturellen Hürden und Herausforderungen sehen Sie, wenn der SIA-DT Prozess in Ihrem Unternehmen als Prozessstandard eingeführt würde?

*A5: Da werden sich sicherlich Hürden aufbauen hinsichtlich Fragen des Change-Managements. Inwieweit ist das relativ tradierte kulturelle Umfeld bereits dazu bereit, sich Nachhaltigkeitsaspekten zu öffnen. Ich kann mir gut vorstellen, dass Fragen auftauchen wie: Die Digitalisierung ist noch neu für uns und schon beschäftigen wir uns mit Integration von Nachhaltigkeit in die Digitalisierungsprozesse? Meiner Erfahrung nach sind die Anwendenden nur in einem gewissen Umfang bereit für die Adaption neuer Technologien und Prozesse. Der gerade ohnehin stattfindende Umbruch in der Industrie bezogen auf die Digitalisierung verlangt den Mitarbeitenden viel ab. Jetzt noch das Thema Nachhaltigkeit zu*

---

*integrieren, auch wenn das Thema ohne Frage besonders wichtig ist, könnte überfordernd sein.*

**F6:** Müssten Ihrer Erfahrung nach, neben dem Nachhaltigkeitsmanagement, dem Projektmanagement, den technischen Experten und Expertinnen und dem Top Management, weitere Stakeholder im Unternehmen / in der Institution in den Prozess mit eingebunden werden und wenn Ja, welche weiteren Stakeholder müssten in den Prozessablauf mit eingebunden werden?

*A6: Ich denke die aufgezählten Stakeholder sind ausreichend.*

**F7:** Welche Probleme traten bei der Bewertung von Technologien in Bezug auf Nachhaltigkeit auf.

*A7: Aktuell wird im Umfang von Digitalisierungsprojekten bei uns noch keine konkrete Methode wie bspw. die LCA für die Nachhaltigkeitsbewertung eingesetzt.*

### **(IMPLEMENTIERUNG [I])**

Erweiterung des prozessualen Ansatzes DMME für die Implementierung der Technologien

**F1:** Haben Sie schon einmal vom sogenannten DMME bzw. CRISP-DM Modell gehört und wenn Ja, wie setzen Sie diesen an der Institution / im Unternehmen, in dem Sie tätig sind ein?

*A1: Ich kenne den CRISP-DM Prozess und wir setzen den Prozess ein. Allerdings bedienen wir uns verschiedener Komponenten des Prozessmodells und folgen mit unserer eigenen Vorgehensweise nicht immer den vorgegebenen Schritten.*

**F5:** Wie hoch würden Sie den Nutzen einschätzen, den der Einsatz des DMME oder CRISP-DM Prozess aktuell im Unternehmen / an der Institution, an der Sie beschäftigt sind, erbringt?

*A5: Ich denke das CRISP-DM Prozessmodell hat einen hohen Nutzen für uns.*

**F11:** In der strategischen Nachhaltigkeitsreifegradbewertung (SIA-DT Phase 1) sollen Reifegradmodelle eingesetzt werden, da diese als Empfehlung in der Literatur genannt werden. Welche Methoden setzen Sie bei der strategischen Nachhaltigkeitsbewertung ein bzw. würden Sie hierfür empfehlen?

*A11: Ich denke Reifegrad Modelle sind hier der richtige Weg. In der Digitalisierung werden diese auch eingesetzt. Grundsätzlich ist es gut eine Vision zu haben, wie man sich entwickeln möchte, einen Nordstern, oder um daraus das Bild abzuleiten welche Initiativen in den nächsten 3 bis 5 Jahren diesbezüglich notwendig sind. Natürlich müssen diese regelmäßig iterativ angepasst werden. Ein ähnliches Vorgehen wird sich sicherlich auch bei der Nachhaltigkeit anbieten. Insbesondere weil man nicht genau weiß: Welche neuen Technologien werden auf dem Gebiet noch entwickelt? Welche Rolle spielt Wasserstoff zukünftig? Wie effizient wird die Infrastruktur? Wie wird sich der Strommarkt entwickeln? Die Legislative ist hier sehr dynamisch. Die Industrie befindet sich in einem Umfeld, dass sich schnell ändert. Und diese Modelle sind erstmal ein guter Ausgangspunkt.*

**F12:** In der Nachhaltigkeits- und Risikobewertung (SIA-DT Phase 6) der möglichen Technologieoptionen wird die LCA eingesetzt, da diese als Empfehlung in der Literatur genannt wird. Welche

---

Methoden setzen Sie bei der Nachhaltigkeitsbewertung von Produkten, Prozessen und Technologien ein bzw. würden Sie hierfür empfehlen?

*A12: Hierzu kann ich keine Aussage treffen da wir keine Standards verwenden. Wir führen Technologien ein, um Probleme zu lösen. Im Nachhinein bewerten wir, wie effektiv die Implementierung war. Nach einer festgelegten Periode wird überprüft, ob das Problem tatsächlich behoben wurde oder ob nachgearbeitet werden muss. Dabei wird entschieden, ob die Technologie weiter ausgerollt wird oder das Projekt nicht weiterverfolgt wird.*

**F13:** In der detaillierten technischen und nachhaltigkeitsbezogenen Bewertung des technischen Konzepts (SIA-DT Phase 9) der ausgewählten Technologie wird die SFD eingesetzt, da diese als Empfehlungen in der Literatur genannt werden. Welche Methoden setzen Sie bei der Nachhaltigkeitsbewertung von technischen Konzepten ein bzw. würden Sie hierfür empfehlen?

*A13: Vergleiche A12.*

**F14:** In der letzten Phase des SIA-DT Prozesses (Phase 12) sollen die Nachhaltigkeitsdaten verwaltet und in ein kontinuierliches Monitoring für das mittlere und das Top Management überführt werden. Wie werden im Unternehmen / der Institution, bei der Sie arbeiten aktuell Nachhaltigkeitsdaten erhoben, gespeichert, verwaltet und für Entscheidungsträger aufbereitet bzw. welche Methoden schlagen Sie hier vor?

*A14: Wir erfassen digitale Daten aus unserem Prozess. Wir prüfen mit den Daten, ob Nachhaltigkeitsziele erreicht werden und identifizieren Probleme. Diese Daten werden intern kommuniziert und visualisiert. Allerdings finden die Daten beim Thema Nachhaltigkeitssteuerung noch keinen breiten Einsatz. Für die Nachhaltigkeitsstrategie werden diese Erkenntnisse genutzt aber die Daten werden bisher noch nicht in herkömmlichen Geschäftsprozessen und Berichtswegen genutzt. Die Echtzeit-Anbindung der nachhaltigkeitsbezogenen Daten in Managementinformationssystemen steht aktuell nicht im Fokus.*

Quelle: Eigenerstellung

## Anhang 11: Antworten zum Experten/Expertinnen-Interview 4

DATUM	INTERVIEWER	INTERVIEW MIT:	ROLLE:
14.08.2023	Jannek Hündling	[Anonym]	Abteilungsleitung Maschinen- datenverwertung

### ANMERKUNGEN

Zu Beginn der Interviews wird das Thema des Interviews motiviert, die Methodik der Forschungsarbeit besprochen und der im Rahmen der Masterthesis „Nachhaltigkeit in produzierenden Unternehmen durch Digitalisierung: Konzept zur Nutzung digitaler Technologien zur Erreichung und Verbesserung von Nachhaltigkeitszielen“ entwickelte SIA-DT Prozess (Sustainability Integrated Approach for Digital Technologies) vorgestellt. Dabei werden die Schritte, die im Rahmen der Forschungsarbeit durchgeführt werden, erklärt. Der Prozess wird den Teilnehmenden in graphischer Form präsentiert. Die Einführung in die Interviews soll auf max. 15 min beschränkt werden. Die Interviews sollen zur Evaluation und ggf. Anpassung des Prozesses genutzt werden. Dies wird den Teilnehmenden vor Beginn der Vorstellung mitgeteilt. Das Interview wird insgesamt ca. 45 Minuten dauern.

### ANONYMISIERUNG UND PSEUDONYMISIERUNG

Im Rahmen der Veröffentlichung der Masterthesis kann eine Pseudonymisierung oder Anonymisierung erfolgen: Die Präferenz des Teilnehmenden wird unten festgehalten.

- Keine Anonymisierung / Pseudonymisierung bei Veröffentlichung gefordert
- Anonymisierung / Pseudonymisierung bei Veröffentlichung
- Individuelle Absprache

### AUDIODATEN UND TRANSKRIPTION

Das Interview wird für eine Transkription aufgezeichnet. Die wichtigsten Antworten der Teilnehmenden werden den untenstehenden Fragen zugeordnet und dem Teilnehmenden schriftlich per E-Mail zur finalen Bestätigung der Aussagen zugesandt. Nach der Bestätigung und ggf. Anpassung der Zusammenschrift werden die Audioaufzeichnungen der Interviews umgehend vernichtet. Die Zusammenschrift der Interviews wird zusammen mit der Forschungsarbeit am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen planmäßig bis zum 06. November 2023 eingereicht und unterliegt ab diesem Zeitpunkt den Datenschutzregelungen der TU Darmstadt.

### ALLGEMEIN [A]:

Allgemeines zur Person und zur Institution / zum Unternehmen

**F1:** Wie lautet Ihre aktuelle Positionsbezeichnung?

**A1:** Ich bin Abteilungsleiter der Abteilung Maschinendatenverwertung.

**F2:** Wie lange sind Sie schon in Ihrer aktuellen Position tätig?

**A2:** Abteilungsleiter bin ich schon lange, aber die Abteilung Maschinendatenverwertung leite ich seit 2010.

**F3:** Was ist das Kerngeschäft bzw. die Branche des Unternehmens / der Institution, bei der Sie tätig sind?

**A3:** Das Kerngeschäft der Technischen Universität ist die Forschung und Lehre

## IMPLEMENTIERUNG [I]

Erweiterung des prozessualen Ansatzes DMME für die Implementierung digitaler Technologien

**F1:** Haben Sie schon einmal vom sogenannten DMME bzw. CRISP-DM Modell gehört und wenn Ja, wie setzen Sie diesen an der Institution / im Unternehmen, in dem Sie tätig sind, ein?

*A1: Der DMME Prozess ist unser Leitfaden. Daran orientieren wir uns grundsätzlich, um die Anwendersicht mit einzubeziehen, denn die Gefahr bei solchen Projekten besteht darin, dass die Data Science Abteilung Modelle ausprobiert, ohne zu bewerten, wie diese angewendet werden und welcher produktive Nutzen aus dem Modell hervorgeht. Hierfür muss natürlich verstanden werden, dass man im Kontext der Maschinen-Entwicklung und der Maschinen-Betriebe eine gewisse Sensorik braucht. Um diese Aspekte ergänzt der DMME das CRISP-DM Modell. CRISP-DM geht meines Erachtens davon aus, dass die Daten schon vorhanden sind. In der Betriebswirtschaft mag dies so sein. Beispiele sind hier Buchungsdaten, Bestelldaten und Kundendaten. Aber im Kontext der Maschinendaten muss erst die Frage beantwortet werden: Mit welchem Messkonzept erhalte ich meine Daten? Bei uns wird ein Großteil der Arbeit bei solchen Projekten im Test-Bett durchgeführt. Beim gesamten Durchlauf der Projekte orientieren wir uns daher am DMME Prozess. Auch unsere Forschungsanträge werden hierauf aufgebaut. Wir können durch dieses Vorgehen direkt eine geeignete Arbeitsplatzstruktur ableiten. Auch unsere Lehrveranstaltungen sind entlang der Prozessschritte aufgebaut, weil man jeden einzelnen Schritt gut inhaltlich untersetzen kann. Bei uns ist der Einsatz des DMME demnach ein Standard. Natürlich wird es zukünftig Aspekte geben, die in den Prozess integriert werden müssen. Aber der grundsätzliche Ablauf bzw. die Phasen (des DMME Prozesses, Anm. d. Verf.) bleiben.*

**F2:** Sind Ihnen Versuche bekannt, den DMME für die Implementierung anderer digitaler Technologien einzusetzen als der Implementierung von Künstlicher Intelligenz?

*A2: Mir sind keine anderen Arbeiten bekannt, die den DMME für andere Zecke und andere Technologien nutzen als der KI-Implementierung.*

**F3:** Wie würden Sie den Einsatz des DMME Prozesses als generellen Implementierungsprozess für datengetriebene Technologien bewerten?

*A3: All diese Technologien basieren am Ende auch auf Modellen. Bei diesen Technologien sind andere Fachgebiete betroffen, aber viele Aspekte sind gleich. Zum Beispiel das Thema Modell Monitoring: Was passiert eigentlich mit dem Modell über die Zeit, wenn immer mehr Daten einfließen? Letztlich gibt es auch bei diesen Technologien verschiedene Rollen in der Umsetzung. Beispiele sind hier die Anlagenführung, die Arbeitsvorbereitung oder die Qualitätssicherung. Auch bei diesen Technologien ist oftmals die Data Science Abteilung mit betroffen. Am Ende brauchen alle Rollen eigene Aufbereitungen und Visualisierungen der Daten. Jede Rolle möchte eigene Fragen beantworten. Letztlich liegt der Unterschied nur in der technischen Bereitstellung. Für mich ist die*



---

*Nutzung des DMME bei anderen Technologien nur eine Frage, wie ich den Nutzer unterstütze und die Informationen, die diese benötigen aufbereite. Der Arbeitsschritt der technischen Bereitstellung ist bereits im DMME Prozess enthalten. Gerade die Deployment Phase ist hier wichtig, da hier die Ergebnisse am Arbeitsplatz bereitgestellt werden müssen oder mit den Ergebnissen Entscheidungen unterstützt werden. Man kann mit den Modellen entscheiden, welche Maßnahmen und Aktionen umgesetzt werden, wenn ein bestimmter Zustand entdeckt oder prognostiziert wird. Generell denke ich wäre es möglich den (DMME, Anm. d. Verf.) Prozess auch bei der Implementierung anderer (digitaler, Anm. d. Verf.) Technologien zu nutzen.*

**F4:** Welche Gründe sprechen Ihrer Meinung für oder gegen die Nutzung des DMME bzw. CRISP-DM Modell als Prozessmodell bei der nachhaltigkeitsorientierten Implementierung von digitalen Technologien?

*A4: Anders als bei der Frage, ob der DMME für die Implementierung anderer (digitaler, Anm. d. Verf.) Technologien genutzt werden kann ist bei dieser Frage der Inhalt der Daten der treibende Faktor und nicht die Darstellungsweise der Daten. Es sind hier andere Fragen zu stellen: Was für Daten werden betrachtet, und welche Daten beinhaltet das Modell? Es müssen Daten zur Ergonomie, Psychologie, Arbeitswissenschaft und Daten aus anderen Disziplinen eingebunden werden. Hierbei ist es wichtig welche Daten betrachtet werden und welche Daten in das Modell gespeist werden. Wenn Nachhaltigkeit in die Modelle überführt werden soll, kann das Modell nicht rein technisch aufgebaut werden. Es reicht also nicht, ausschließlich Werte zu technischen Größen wie Qualität, Fehler-Statistik und Fehler-Ursachen etc. in das Modell aufzunehmen. Vielmehr sollten diese Daten als Basis für einen Regelkreis genutzt werden, um ggf. die Prozesse anzupassen. So kann man einen multikriteriellen Ansatz verfolgen. Ich finde, gerade im Ingenieurwesen, sollte vielmehr darauf geachtet werden, welcher Einfluss auf die Umwelt ausgeübt wird. Es werden Maschinen gebaut, die Ressourcen verbrauchen. Gerade Maschinen die Produkte herstellen, welche selbst wiederum auch Ressourcen verbrauchen, treiben die Umweltauswirkungen an. Auch bei den Werkstoffen, die verarbeitet werden, muss darauf geachtet werden, welche Einflüsse diese eigentlich auf die Umwelt haben. Bei der Nachhaltigkeitsintegration gehört das alles mit dazu. Am wichtigsten ist aber sicherlich das Feedback der Modelle. Dieses muss genutzt werden, um Prozesse anzupassen. Ein Beispiel wäre die Kunststofftechnik: Heute wird dort viel mit Rezyklaten in Granulaten gearbeitet. Dort müssen Fragen beantwortet werden wie: Verarbeitet sich das Granulat mit den Rezyklaten noch so wie vorher? Welche Änderungen am Prozess sind notwendig? An der eigentlichen Machine Learning Technologie und den Algorithmen ändert das nichts. Es müssen allerdings weitere Spalten in der (Daten, Anm. d. Verf.) Tabelle mit nachhaltigkeitsrelevanten Messwerten ergänzt werden. Nachhaltigkeit ist also eher eine*

---

*Sache der Optimierung. Ich muss heute nach deutlich mehr Kriterien optimieren als es bislang der Fall war. Die Produkte sollen umweltverträglich sein, aber erschwinglich. Der Kunde muss immer noch bereit sein, das Produkt zu kaufen. Wenn wir die Produktpreise betrachten, werden sich die CO<sub>2</sub> Zertifikate in diesen niederschlagen, weil diese Schritt für Schritt teurer werden. Dadurch entsteht ein Druck die Prozesse in Sachen Nachhaltigkeit und Umweltwirkung, insbesondere auf den CO<sub>2</sub> Aspekt bezogen, konkurrenzfähiger zu machen. Es ist also gerade hier wichtig, das Modell in Verbindung mit multikriterieller Optimierung zu sehen. Nur Nachhaltigkeit zu betrachten, ohne die Berücksichtigung der anderen Aspekte, ist nicht sinnvoll. Nachhaltigkeit ist zwar zwingend notwendig, das sehe ich auch so, aber das breite Verständnis dafür muss noch geschaffen werden. Am Ende ist es aber immer eine Frage der Ressourcen wie das Thema angegangen wird. Ich denke aber das Nachhaltigkeitsziele als weiteres Element in der multikriteriellen Optimierung Platz finden werden.*

**F7:** Falls noch nicht im SIA-DT vorhanden: welche Phasen sind Ihrer Meinung nach kritisch, wenn es um die Integration von Nachhaltigkeit in Implementierungsmodelle wie dem DMME oder CRISP-DM geht?

*A7: Dieses Thema ist sehr komplex. An der Entwicklung des DMME Prozesses habe ich ein Jahr gearbeitet. Die Grundlage waren dabei 20-30 Projekte. Die Vorgehensmodelle der einzelnen Projekte wurden übereinandergelegt und gleiche Phasen in diesen Projekten, die sinnvoll zusammengefasst werden konnten, als einheitliche Phasen in den DMME Prozess aufgenommen. Für Entwicklungsprozesse gibt es im Maschinenbau Entwicklungsmodelle bzw. Vorgehensmodelle wie die Modelle der VDI 2221 und 2222. In diesen Workflows gibt es Aufgaben in denen datengetriebene Methoden eingesetzt werden. Wie beim Einsatz solcher Methoden zwischen einzelnen Workflows kommuniziert wird, kann mit dem DMME standardisiert werden. Dabei stellt sich die Frage erst einmal nicht, ob sich die Phasen des DMME Prozesses für die Nachhaltigkeitsintegration eignen. Die Nachhaltigkeit ist eine eigene Entwicklungs- oder Bewertungszielgröße im Entwicklungsprozess. Ob ich Messdaten, die die Nachhaltigkeit beschreiben können, in die Datenanalyse mit einbeziehe, das ist eher die Konsequenz. Aber diese Konsequenz ändert die DMME-Phasen nicht. Ich sehe die Integration der Nachhaltigkeitszielgrößen in der Phase des technischen Verständnisses. In dieser Phase werden sich Gedanken gemacht, welche Zielgrößen wir integrieren. Wir nutzen hier bspw. das Ishikawa-Diagramm. Andere Methoden sind aber auch einsetzbar. Mit diesen Methoden werden Einflussgrößen untersucht, die sich auf die Zielgrößen des Entwicklungsprozesses auswirken können. Für die Integration der Nachhaltigkeitsaspekte benötige ich allerdings Datendateien. Gerade im Hinblick auf Nachhaltigkeit, sind diese Daten aber nicht automatisch in allen Unternehmen vorhanden. Viele Unternehmen haben selbst nicht die Möglichkeit die Nachhaltigkeitsdaten zu messen,*

---

die für die Anpassungen in der Modellierung nötig wären. In der Praxis ist es meist so, dass man sich für die Berechnung der Nachhaltigkeitsdaten eine externe Software, wie bspw. die Umberto Software zukaufte. Für das Granulat, den Beton, das Coil Blech, Kohlefasern, Glasfaser oder andere Werkstoffe gibt es in der Software tabellen, in denen Umweltdaten zu bestimmten Produkten erfasst sind. Mathematisch betrachtet, verbirgt sich dahinter eine einfache Mengenlehre. Ein Beispiel: Man kauft als Unternehmen 3 Tonnen Werkstoff ein die mit dem LKW 100 km transportiert werden. Die Software nimmt Mittelwerte für den Lkw und geht bspw. von einem Verbrauch von 30 Liter Diesel pro 100 Kilometer aus. Für das Produkt und den Transport, für die man zusätzliche Angaben (wie Menge, Strecke und Fahrzeugart, Anm. d. Verf.) in die Software eingibt, kann die Software dann entsprechende Umweltdaten generieren. Daten, die man im Maschinenbau meist selbst messen kann, sind Energieverbräuche an den Maschinen, Verschleiß an Werkzeugen, Ressourcenverbräuche und soziale Kennzahlen wie Arbeitszeit etc. Alle diese Daten müssen dann in den Datensatz integriert werden. Diese Aufgaben gehören meiner Meinung bereits zur Phase Data Understanding bzw. Data Preparation. Nachhaltigkeit wird also in diesen Phasen des DMME Prozesses integriert. Der DMME ist ein Phasenmodell auf der Metaebene. Es stellt sich hier die Frage, ob ich zusätzliche Phasen ergänze, so wie Sie es vorschlagen, oder ob ich zu einer bestehenden Phase diese zusätzlichen Arbeitsschritte, die durch die Integration von Nachhaltigkeitszielgrößen entstehen, ergänzen muss.

**F8:** Wie schätzen Sie die Struktur des SIA-DT, im Bezug zur Integration des DMME Prozesses ein?

**A8:** Ich denke, dass die von Ihnen im (SIA-DT, Anm. d. Verf.) Prozess ergänzten Phasen eher eine weitere Aufschlüsselung der existierenden DMME-Phasen sind. Bei uns ist die Phase der Technischen Implementierung die Überführung des Test-Betts oder des Prototyps in eine Produktivumgebung. Zu dieser Phase gehört auch die Visualisierung. Das Modell ist ein Modell auf der Meta-Ebene. Bei der Untersetzung der Arbeitsschritte ist es grundsätzlich möglich Erweiterungen einzubauen, die in einzelnen Projekten gebraucht werden. Sehr wichtig bei diesem Prozess ist eine durchgängig hohe Datenqualität zu erreichen. Wenn wir von Anfang an mit unzureichender Datenqualität arbeiten werden auch die Ergebnisse entsprechend ausfallen. Ein wesentlicher Vorteil des DMME ist das die Datenqualität fokussiert wird. Wir hatten bisher noch kein konkretes Beispiel für die Anwendung des DMME bei einem solchen Nachhaltigkeitsprojekt. Erst einmal könnte man sich aber Gedanken machen, für Projekte bei denen auch Nachhaltigkeitsdaten vorliegen, den DMME in der Form wie er jetzt ist zu nutzen. In der ersten (DMME, Anm. d. Verf.) Phase, dem Business Understanding würde man dann strategische Probleme untersuchen bzw. Bereiche, in denen das Unternehmen seine Leistung verbessern möchte oder in denen von den Kunden eine

---

Verbesserung gefordert wird. Ein Beispiel hierfür sind die Erdgas und die Erdölkosten welche immer weiter steigen und somit die Energiekosten der Produktion in die Höhe treiben. Durch die Integration von Umweltzielen für die Prozesse sehen wir direkt welche Prozesse stark betroffen sind. In der Regel natürlich die ressourcen- und energieintensiven Prozesse. Ein aktuelles Beispiel aus der Fertigung von Keramikteilen zeigt, dass die Nutzung alternativer Brennstoffe bzw. Energien für die Erzeugung der Prozesswärme Einfluss auf die Qualität der Produkte hat. Es geht also nicht mehr nur ums Energie sparen, sondern um eine multikriterielle Optimierung des Prozesses, sodass meine Teile funktionstüchtig bleiben und ich dennoch umweltfreundliche Prozesse erreiche. Dazu muss bewertet werden ob für die zusätzlichen Modell-Dimensionen überhaupt genug Daten erhoben werden oder ob zukünftig zusätzliche Sensorik notwendig ist. Welches Modell für die Aufgabe geeignet ist, dass ist in der Phase des Model Building und der darauffolgenden Evaluation enthalten. Bei der Integration von Nachhaltigkeit werden also lediglich die Systemgrenzen der Betrachtung verschoben. Die (von Ihnen, Anm. d. Verf.) angesprochene Risikobewertung steckt in Kennzahlen wie der Modellgenauigkeit oder der Konfusionsmatrix. Diese Metriken erlauben auch zu messen, ob die Qualität der eingegebenen Daten mangelhaft oder fehlerbehaftet ist. Dabei lässt sich auch das Risiko des Modells (quantitativ, Anm. d. Verf.) bewerten, z. B. mit einer Fehlermöglichkeitseinflussanalyse, welches (bezogen auf den Modeloutput, Anm. d. Verf.) besteht, wenn fehlerhafte Daten oder Daten mit schlechter Qualität in das Modell hineingegeben werden. Auf der Metaebene können dann Feedbackschleifen eingerichtet werden. So kann man rechtzeitig reagieren, wenn ein Modell in der Labor-Umgebung funktioniert aber beim Deployment in der Produktion Probleme bereitet. Hier können wir bspw. mit Gateways arbeiten, die uns in diesem Fall zurück zum Technical Understanding schicken. Gegebenenfalls muss dann Messtechnik nachgerüstet werden oder eine neue Schnittstelle eingekauft werden etc. Dadurch erhalten wir neue Daten. Mit diesen Daten wird das Modell angepasst. Danach erfolgt eine neue Evaluierung des Modells. Dabei muss die Komplexität der Problemstellung mit einbezogen werden, da diese entscheidend für die Modellauswahl ist. Komplexe Probleme benötigen Modelle mit hoher Parameterzahl während wenig komplexe Problemstellungen oftmals auch durch Modelle mit weniger Parametern gelöst werden können. Das sind alles Kriterien, die in der Schleife der Modellentwicklung zu beachten sind. Egal welche der drei Säulen der Nachhaltigkeit betrachtet werden soll, am Ende hängt die Integration von den Daten bzw. Messwerten ab die wir in das Modell geben. Man kann aber auch darüber hinaus gehen und sagen wir nehmen neben den Daten auch noch unser Wissen mit in den Prozess. Dann sind wir im Bereich der Grey-Box Modelle. Sie sehen also, die Integration der Nachhaltigkeit und des Wissens um die Nachhaltigkeit kann beliebig komplex werden.

---

**F9:** Welche Faktoren könnten die Skalierbarkeit des SIA-DT Prozesses beeinflussen?

*A9: Übersprungen.*

**F10:** Nach Ihrer Expertise: Welches Vorgehen würden Sie empfehlen, um den SIA-DT neben den durchgeführten Experteninterviews auf Anwendbarkeit, Verständlichkeit und Nutzen zu evaluieren?

*A10: Übersprungen.*

**F11:** In der strategischen Nachhaltigkeitsreifegradbewertung (SIA-DT Phase 1) werden Reifegradmodelle eingesetzt, da diese als Empfehlungen in der Literatur genannt werden. Welche Methoden setzen Sie bei der strategischen Nachhaltigkeitsbewertung ein bzw. würden Sie hierfür empfehlen?

*A11: Übersprungen.*

**F12:** In der Nachhaltigkeits- und Risikobewertung (SIA-DT Phase 6) der möglichen Technologieoptionen wird die LCA eingesetzt, da diese als Empfehlung in der Literatur genannt wird. Welche Methoden setzen Sie bei der Nachhaltigkeitsbewertung von Produkten, Prozessen und Technologien ein bzw. würden Sie hierfür empfehlen?

*A12: Übersprungen.*

**F13:** In der detaillierten technischen und nachhaltigkeitsbezogenen Bewertung des technischen Konzepts (SIA-DT Phase 9) der ausgewählten Technologie wird die SFD eingesetzt, da diese als Empfehlungen in der Literatur genannt werden. Welche Methoden setzen Sie bei der Nachhaltigkeitsbewertung von technischen Konzepten ein bzw. würden Sie hierfür empfehlen?

*A13: Übersprungen.*

**F14:** In der letzten Phase des SIA-DT Prozesses (Phase 12) sollen die Nachhaltigkeitsdaten verwaltet und in ein kontinuierliches Monitoring für das mittlere und das Top Management überführt werden. Wie werden im Unternehmen / der Institution, bei der Sie arbeiten aktuell Nachhaltigkeitsdaten erhoben, gespeichert, verwaltet und für Entscheidungsträger aufbereitet bzw. welche Methoden schlagen Sie hier vor?

*A14: Übersprungen.*

## **SYSTEMATISIERUNG [SY]**

Systematisierung eines Einsatzes digitaler Technologien für die Nachhaltigkeitserreichung

**F1:** Wie würden Sie den Einfluss eines praxis- und management-orientierten Ansatzes wie dem SIA-DT Prozessmodell, für die Systematisierung der Erreichung von Nachhaltigkeit in der Industrie einschätzen?

*A1: Eine akzeptierte Vorgehensweise oder eine Roadmap, die das methodische Vorgehen beschreibt, hilft immer. Dabei gilt je nachvollziehbarer und logischer die einzelnen Phasen beschrieben sind, desto hilfreicher ist das Modell für die Praxis. Der Prozess ist eine Arbeitsunterstützung. Was ebenfalls eine große Rolle spielt, ist die Akzeptanz gegenüber Nachhaltigkeit allgemein. Die Akzeptanz für Nachhaltigkeit und nachhaltige Prozesse muss im*

---

gesamten Unternehmen vorhanden sein bzw. aufgebaut werden. Aber auf jeden Fall muss Nachhaltigkeit ein Geschäftsziel sein und deswegen gehört zum Business Understanding, dass die Geschäftsführung eine nachhaltigkeitsgetriebene Zielstellung definiert. Der Workflow ist ein Leitfaden, um diese Ziele zu erreichen. Dabei ist die Teamarbeit der verschiedenen Rollen entscheidend für den Erfolg. Die Konstruktion, die Fertigungssteuerung, Prozessverantwortliche und auch der Data Science Bereich arbeiten hier zusammen. Nachhaltigkeit ist wie die Digitalisierung am Ende eine Gesamtaufgabe für das Unternehmen. Daher ist dies auch auf die Management Ebene zu heben.

**F4:** Welche organisatorischen, prozessualen und ggf. unternehmenskulturelle Hürden und Herausforderungen sehen Sie, wenn der SIA-DT Prozess in Ihrem Unternehmen als Prozessstandard eingeführt würde?

*A4: Den DMME Prozess gibt es noch nicht so lange wie andere Modelle. Der DMME ist noch relativ neu. Erst wurde längere Zeit das CRISP-DM Modell verwendet und in der Industrie-Praxis festgestellt, dass es nicht besonders gut funktioniert, weil meist offene Fragen entstehen, die nach dem CRISP-DM Modell nicht beantwortet werden. Der DMME bietet eine Systematik, die mit den ergänzten Phasen diese Fragen beantwortet. Das ist schließlich der Neuigkeitsgrad des Modells im Vergleich zum CRISP-DM. Wenn man den ganzen Prozess jetzt um die Nachhaltigkeitssichtweise erweitert, ist die Akzeptanz vermutlich umso größer, desto mehr ich das Thema in vorhandene bereits genutzte und verstandene Prozesse und Arbeitsschritte integriert wird. Das Ziel sollte sein die Akzeptanz zu erhöhen indem gezeigt wird das die Nachhaltigkeit im DMME mitbetrachtet werden kann. Dabei müssen die technischen Phasen des DMME gar nicht so sehr geändert werden. Wichtiger ist, dass die Motivation für Nachhaltigkeit in den Prozess integriert wird.*

**(STELLHEBEL [S])**

Shop-Floor Stellhebel in Industrie-Unternehmen zur Erhöhung der Nachhaltigkeit durch digitale Technologien

**F3.1:** Welchen der Technologien KI, IoT, Robotics, Big Data, Cloud Computing, AR, VR und 3D-Printing oder der in **F2** genannten Technologien würden Sie der insgesamt höchste Bedeutung zuordnen, wenn es um die Erreichung einer nachhaltigen produzierenden Industrie geht?

*A3.1: Diese Technologien sind keine Alternativen. Einige der genannten Technologien sind hardwareseitig und andere wie die KI ganz auf der Ebene der Algorithmik. Man kann nicht sagen: Der Algorithmus ist wichtiger als der Computer. Das ganze Thema Nachhaltigkeit und Digitalisierung ist so komplex, dass man grundsätzlich immer datengetrieben arbeitet. Zunächst wird sich dabei natürlich für einen Algorithmus entschieden, um die Problemstellung zu lösen. Im nächsten Schritt würde man dann betrachten, wo die Infrastruktur mit der entsprechenden Rechenleistung für diese Algorithmik installiert ist, bzw. wird. Das hat viel mit der Unternehmensstruktur zu tun und wo dieses Unternehmen die Rechencenter hat. Natürlich sind auch andere Fragen*

---

wichtig: Schau ich einzelne Maschinen an? Oder wie im Produktionsmanagement: Schau ich mir die Fabrik oder verschiedene Standorte an? Hierfür wird dann eine Datenhierarchie aufgebaut. Ich bestimme die Daten-Quellen in Verbindung mit den Datenmengen und arbeite das Konzept aus, wie diese Daten verarbeitet werden können. Dabei stellen sich natürlich die Fragen: Brauche ich Edge Computer oder reicht eine Schnittstelle zum Manufacturing Execution System oder werden Cloud-Dienste etc. verwendet. Am Ende kommt es auch auf die Sicherheitsanforderungen an. Diese Dinge sind dann aber eher die Umsetzung der Algorithmen und der Modelle. Daher sind alle diese Technologien wichtig, da alle in irgendeiner Form in den einzelnen Ausbaustufen vorkommen. Welche konkreten Technologien gebraucht werden ist fallspezifisch für verschiedene Prozesse.

**F3.2:** Welche Technologie hat für die Erreichung einer sozialen Nachhaltigkeit in der Industrie die größte Bedeutung?

A3.2: *Vergleiche A3.1.*

**F3.3:** Welche Technologie hat für die Erreichung einer ökonomischen Nachhaltigkeit in der Industrie die größte Bedeutung?

A3.2: *Vergleiche A3.1.*

**F3.4:** Welche Technologie hat für die Erreichung einer ökologischen Nachhaltigkeit in der Industrie die größte Bedeutung?

A3.2: *Vergleiche A3.1.*

Quelle: Eigenerstellung