



TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
CHEMNITZ

# **Schriftenreihe**

## **Betriebliche Umweltökonomie und Nachhaltigkeitsmanagement**

Ausgabe 1/2023

**Constanze Pfaff**

Bewertung von cyber-physischen Systemen – State of the Art



**Prof. Dr. Marlen Gabriele Arnold (Hrsg.)**

## Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Titelgraphik: Vierthaler und Braun, München

Schriftenreihe Betriebliche Umweltökonomie und Nachhaltigkeitsmanagement

Herausgeber: Technische Universität Chemnitz  
Fakultät Wirtschaftswissenschaften  
Professur Betriebswirtschaftslehre, Betriebliche Umweltökonomie  
Prof. Dr. Marlen Gabriele Arnold  
Thüringer Weg 7  
09126 Chemnitz  
<https://www.tu-chemnitz.de/wirtschaft/bwl8/index.php>

ISSN 2567-7934

<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-223462>



Das Werk - ausgenommen das Logo der Technischen Universität Chemnitz, die Titelgraphik, Zitate und anderweitig gekennzeichnete Teile – ist lizenziert unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (CC BY 4.0). Lizenzvertrag: [Creative Commons Namensnennung 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

## Zur Schriftenreihe

Die Schriftenreihe Betriebliche Umweltökonomie und Nachhaltigkeitsmanagement bietet ein interdisziplinäres Forum für Forschung über aktuelle Themen im Bereich der trans-, interdisziplinär sowie systemisch und integrativ ausgerichteten Nachhaltigkeitsforschung.

In der Schriftenreihe werden innovative wissenschaftliche Aufsätze und konzeptionelle Beiträge zur Stärkung der inter- und transdisziplinären Nachhaltigkeitsforschung publiziert. Mit der Veröffentlichung von Studien-, Seminar- und Forschungsergebnissen trägt die Technische Universität Chemnitz essentiell dazu bei, den Wissenstransfer zwischen Forschungseinrichtungen sowie zwischen Praxis und Wissenschaft zu stärken.

Das Themenspektrum der Schriftenreihe ist breit gefächert und zielt auf Forschungsarbeiten und Praxiserfahrungen aus ökonomischer und interdisziplinärer Sicht im Bereich Nachhaltigkeit.

In der Schriftenreihe werden Beiträge sowohl in deutscher als auch in englischer Sprache veröffentlicht.

### **Schlüsselwörter**

Innovative Ansätze, Betriebliche Umweltökonomie, Nachhaltigkeitsmanagement, Systemische Konzepte, Integrative Konzepte, Interdisziplinäre Forschungsansätze

### **Series Corporate environmental management and sustainability management**

The scientific series of corporate environmental economics and sustainability management offers an interdisciplinary forum for research on current topics in the area of trans-, interdisciplinary and systemic and integrative sustainability research.

Innovative scientific essays and conceptual contributions strengthening interdisciplinary and transdisciplinary sustainability research are published in the series. With the publication of study, seminar and research results, the Technical University of Chemnitz contributes significantly to the transfer of knowledge between research facilities and between practice and science.

The series comprises a broad thematic spectrum and aims at research and practical experience from an economic and interdisciplinary perspective.

Contributions are possible in German and English.

### **Key words**

Innovative approaches, Corporate environmental management, Sustainability management, Systemic concepts, integrative concepts, interdisciplinary research approaches

## Open Access

Die Schriftenreihe Betriebliche Umweltökonomie und Nachhaltigkeitsmanagement wird ausschließlich online bereitgestellt. Die Herausgeberin unterstützt open access, um neue wissenschaftliche Erkenntnisse und Informationen kostenfrei und unbeschränkt zu erhalten.

## Zitation des Beitrags

Pfaff, C. (2023). Bewertung von cyber-physischen Systemen – State of the Art. in Arnold, M. (Hrsg.), Schriftenreihe Betriebliche Umweltökonomie und Nachhaltigkeitsmanagement, 1/2023, Chemnitz.

## **Bewertung von cyber-physischen Systemen – State of the Art**

### Anmerkung

---

Die zugrunde liegende Masterarbeit wurde an der Professur Unternehmensrechnung und Controlling (Technische Universität Chemnitz) durch Prof. Dr. Prof. h. c. Uwe Götze sowie Kristina Höse (M.Sc.) betreut.

### Abstract

---

Unternehmen werden gegenwärtig mit den Themen der Nachhaltigkeit und der fortschreitenden Industrie 4.0 vor immer komplexere Herausforderungen gestellt. Ein Bestandteil der neuen Basistechnologien stellen cyber-physische Systeme (CPS) dar, die bereits gegenwärtig und zukünftig mit den Zielen der nachhaltigen Entwicklung in Einklang gebracht werden müssen. Die vorliegende Arbeit geht den Forschungsfragen nach, wie CPS definiert, charakterisiert und unter Einbezug nachhaltiger Kriterien bewertet werden können. Dazu wurden verschiedene, betriebswirtschaftliche Instrumentarien ausgewählt und systematisiert, die folgend im eigens entwickelten und angewandten „Vorgehensmodell zur Prüfung und Eignung von Bewertungsinstrumenten für CPS unter Einbezug der Nachhaltigkeit“ überprüft wurden. Die Untersuchung ergab, dass der Bedarf an Bewertungsansätzen von CPS in Kombination mit der Thematik der Nachhaltigkeit besteht und mit existenten, betriebswirtschaftlichen Methoden größtenteils bewältigt werden kann.

### Schlagworte

---

Nachhaltige Entwicklung, Industrie 4.0, cyber-physische Systeme, Bewertungsinstrumente, Vorgehensmodell

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>II</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>IV</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen der cyber-physischen Systeme in der Industrie 4.0</b>	<b>3</b>
2.1 Begriffsklärung des cyber-physischen Systems . . . . .	3
2.2 Einordnung in die Industrie 4.0 . . . . .	4
2.3 Technischer Aufbau und Charakteristika . . . . .	7
2.4 Herausforderungen und Potenziale . . . . .	11
<b>3 Grundlagen der nachhaltigkeitsbezogenen Bewertung</b>	<b>16</b>
3.1 Begriffsklärung der Nachhaltigkeit . . . . .	16
3.2 Operationalisierung der Nachhaltigkeit . . . . .	17
3.3 Nachhaltigkeit in Unternehmen . . . . .	19
3.3.1 Treiber und Zielstellungen der nachhaltigen Dimensionen . . . . .	19
3.3.2 Kapital der nachhaltigen Dimensionen . . . . .	23
3.4 Bewertungsinstrumente unter Einbezug der Nachhaltigkeit . . . . .	24
3.4.1 Einordnung und Begriffsklärung der Bewertung . . . . .	24
3.4.2 Vorstellung ausgewählter Controllinginstrumente . . . . .	25
<b>4 Untersuchung von Bewertungsansätzen für cyber-physische Systeme</b>	<b>31</b>
4.1 Methodik der Untersuchung . . . . .	31
4.2 Definition allgemeiner Bewertungsanforderungen . . . . .	32
4.3 Bestimmung des Untersuchungsrahmens . . . . .	33
4.4 Definition und Gewichtung der Untersuchungskriterien . . . . .	35
4.5 Untersuchung von Bewertungsansätzen für cyber-physische Systeme . . . . .	36
4.5.1 Übersicht der zu untersuchenden Bewertungsansätze . . . . .	36
4.5.2 Untersuchung zukunftsorientierter Bewertungsansätze . . . . .	38
4.5.3 Untersuchung vergangenheitsorientierter Bewertungsansätze . . . . .	55
4.6 Auswertung und Fazit . . . . .	59
<b>5 Kritische Würdigung und Ausblick</b>	<b>65</b>
<b>Anhang</b>	<b>71</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>VI</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Historischer Abriss der industriellen Revolution, leicht modifiziert und in Anlehnung an SIEPMANN, S.19 . . . . .	5
2.2	Überblick über IoTS, leicht modifiziert und in Anlehnung an HEIDEL u. a., S.58 . . . . .	6
2.3	Referenzarchitekturmodell, modifiziert und in Anlehnung an HEIDEL u. a., S.41 . . . . .	7
2.4	Systematischer Aufbau und Nutzungsdauer einzelner Komponenten des CPS, eigene Darstellung . . . . .	10
3.1	Visualisierung der Nachhaltigkeit, leicht modifiziert und in Anlehnung an KLEINE, S.74 f. . . . .	17
3.2	Integrierendes Nachhaltigkeitsdreieck, leicht modifiziert und in Anlehnung an KLEINE, S.84 . . . . .	18
3.3	Zuordnungsstärke anhand der ökologischen Dimension, leicht modifiziert und in Anlehnung an KLEINE, S.85 . . . . .	19
3.4	Unterscheidung der Unternehmensstrategie, modifiziert und in Anlehnung an STEGER, S.190 ff. . . . .	22
3.5	Einteilung des ökonomischen Kapitals, modifiziert und in Anlehnung an KÜHN; GRÜNIG, S.144 . . . . .	24
3.6	Die Planungsabfolge, leicht modifiziert und in Anlehnung an GRAUMANN, S.5 . . . . .	25
4.1	Vorgehensmodell zur Eignungsprüfung der Bewertungsinstrumente für CPS, eigene Darstellung . . . . .	32
4.2	Ungewichtete Zielhierarchie für ein fiktives FTS, modifiziert und in Anlehnung an GÖTZE, S.198 . . . . .	47
4.3	Netzdiagramm für zwei fiktive FTS, eigene Darstellung . . . . .	49
4.4	Aufbau und Ablauf des LCSA, leicht modifiziert und in Anlehnung an KELLER; RETTENMAIER; REINHARDT, S.144 . . . . .	51
4.5	Das Technologieauswahl-Portfolio und seine Ausprägungen, modifiziert und in Anlehnung an DOMBROWSKI u. a., S.3 . . . . .	54
4.6	Visualisierung der vorgestellten Instrumente im IND, eigene Darstellung	62
4.7	Visualisierung der Potenziale und Herausforderungen von CPS im IND, eigene Darstellung . . . . .	63
4.8	Visualisierung der Instrumente sowie Herausforderungen und Potenziale von CPS im IND, eigene Darstellung . . . . .	64
5.1	Die integrierende Nachhaltigkeitspyramide mit vier Dimensionen, eigene Darstellung . . . . .	67

A.1 Klassifizierung von Controllinginstrumenten, eigene Darstellung . . . . . 72

# Tabellenverzeichnis

3.1	Ausgewählte Controllinginstrumente und deren Zeitbezug, eigene Tabelle	30
4.1	Kriterien zur Untersuchung der Bewertungsinstrumente, eigene Tabelle .	36
4.2	Legende der Kriterienausprägungen, eigene Tabelle . . . . .	36
4.3	Ausgewählte und spezielle zu untersuchende Instrumente und deren Zeitbezug, eigene Tabelle . . . . .	37
4.4	Ausprägungen der Kriterien für das Target Costing, eigene Tabelle . . .	40
4.5	Ausprägungen der Kriterien für die KW-Methode, eigene Darstellung .	42
4.6	Ausprägungen der Kriterien für die Nutzwertanalyse, eigene Tabelle . .	50
4.7	Ausprägungen der Kriterien für das LCSA, eigene Tabelle . . . . .	53
4.8	Ausprägungen der Kriterien für die prozessorientierte Potenzialanalyse, eigene Tabelle . . . . .	55
4.9	Ausprägungen der Kriterien für die Prozesskostenrechnung, eigene Tabelle	57
4.10	Ausprägungen der Kriterien für den KMP-Ansatz zur Komplexitätbewertung von CPS, eigene Tabelle . . . . .	59
4.11	Übersicht der Kriterienausprägungen untersuchter Instrumente, eigene Tabelle . . . . .	60
A.1	Potenziale der Kosteneinsparungen durch CPS, modifiziert und in Anlehnung an BAUERNHANSL, S.31. . . . .	71

# Abkürzungsverzeichnis

ABC	Activity-Based-Costing
BDSG	Bundesdatenschutzgesetz
BWL	Betriebswirtschaftslehre
CPS	cyber-physisches System
FTS	fahrerloses Transportsystem
I4.0	Industrie 4.0
IND	Integrierendes Nachhaltigkeitsdreieck
IIC	Industrial Internet Consortium
IVI	Industrial Value-Chain Initiative
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
IoTS	Internet of Things and Services
IO	Investitionsobjekt
KMP	Kooperationsnetzwerk Moderne Produktion
KW	Kapitalwert
LCA	Life Cycle Assessment
LCC	Life Cycle Costing
LCSA	Life Cycle Sustainability Assessment
SBSC	Sustainability Balanced Scorecard
SLCA	Social Life Cycle Assessment
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung
SDG	Sustainable Development Goals
TC	Target Costing
VWL	Volkswirtschaftslehre

# 1 Einleitung

Mit dem gegenwärtigen Beginn der vierten industriellen Revolution, ebenfalls Industrie 4.0 (I4.0) genannt, werden Unternehmen zunehmend vor komplexe Herausforderungen gestellt, die es zu bewältigen gilt.<sup>1</sup> Einerseits verändern enorme Fortschritte der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) inner- und übertriebliche Aufbau- und Ablaufstrukturen der Unternehmen.<sup>2</sup> Eine der fünf Basistechnologien der I4.0 sind cyber-physische Systeme (CPS), die physische und virtuelle Umgebung global und wertschöpfungsübergreifend miteinander verknüpfen.<sup>3</sup> Daraus resultieren vielzählige Potenziale, aber auch Problemfelder, die individuell von jedem Unternehmen beurteilt werden müssen. Andererseits werden Unternehmen zunehmend mit nachhaltigen Themen, die ökonomische, ökologische und soziale Bereiche betreffen, konfrontiert.<sup>4</sup> Die dringende Entwicklung innovativer Geschäftsmodelle, die Übernutzung von Ressourcen und ungerechte Lohn- und Gehaltsverteilungen sind einige davon.<sup>5</sup> Es ist bereits zum aktuellen Zeitpunkt offensichtlich, dass Unternehmen ihre langfristige Existenz nur sichern können, indem sie neuartige Technologien in ihre Wertschöpfung integrieren und diese mit nachhaltigen Aspekten abstimmen.<sup>6</sup> Die Kombination und Bewältigung beider Problemfelder stellen für Unternehmen eine bedeutende Herausforderung dar. Das Controlling, das in vorliegender Arbeit auf ein Einwirken des gesamten Führungssystems abzielt, inkludiert zahlreiche klassische und spezifische Instrumente, die zur bewertenden Vereinigung von CPS und Nachhaltigkeit angewandt werden können. Aus diesem Zusammenhang ergibt sich die Forschungsfrage, welche Bewertungsansätze sich zur aussagekräftigen Beurteilung von CPS unter Einbezug der Nachhaltigkeit eignen. Dazu sind im Vorfeld weitere Fragestellungen zu klären:

- Wie werden CPS definiert, charakterisiert und welche Problem- und Potenzialfelder können identifiziert werden?
- Welchen Einfluss hat die Nachhaltigkeit auf Unternehmen und welche Zielstellungen ergeben sich daraus?
- Welche Bewertungsansätze, die Nachhaltigkeit einbeziehend, bestehen gegenwärtig und wie lassen sich diese operationalisieren?

Die vorliegende Arbeit ist in weitere vier Bereiche aufgeteilt. In Kapitel 2 werden die zur Bewertung benötigten Grundlagen von CPS erörtert. Dazu werden die cyber-physischen Konstrukte u.a. in die I4.0 eingeordnet und charakterisiert. Herausforderungen und Potenziale in Hinblick auf diese neuartige Basistechnologie runden diesen Abschnitt der Arbeit ab. Eine grundlegende Aufarbeitung der Thematik Nachhaltigkeit in Hinblick

---

<sup>1</sup>Vgl. BAUERNHANSL, T.: (Weg), S.10 f.

<sup>2</sup>Vgl. PÖTTER, T.; FOLMER, J.; VOGEL-HEUSER, B.: (Prozessindustrie), S.159 f.

<sup>3</sup>Vgl. SIEPMANN, D.: (Paradigmen), S.37.

<sup>4</sup>Vgl. SAILER, U.: (Nachhaltigkeitscontrolling), S.28.

<sup>5</sup>Vgl. ebenda; PUFÉ, I.: (Nachhaltigkeit), S.26.

<sup>6</sup>Vgl. WALL, F.; SCHRÖDER, R. W.: (Shareholder Value), S.262; ABELE, E.; REINHART, G.: (Zukunft), S.168.

auf Bewertungsinstrumente folgt in Kapitel 3. Dazu werden Operationalisierungsmöglichkeiten vorgestellt und der nachhaltige Einfluss auf Unternehmen skizziert. Darauf aufbauend wird anschließend ein Überblick verschiedenartiger Controllingansätze zur Bewertung unter Einbezug der Nachhaltigkeit gegeben. In Kapitel 4 werden die Thematik CPS und Nachhaltigkeit zusammengeführt, indem eine Beurteilung ausgewählter Bewertungsansätze für die Basistechnologie u.a. unter ökonomischen, ökologischen und sozialen Aspekten durchgeführt wird. Die Untersuchung erfolgt anhand eines eigens entwickelten Vorgehensmodells. Eine kritische Würdigung und ein Ausblick auf künftige Forschungsbedarfe schließen die vorliegende Arbeit in Kapitel 5 ab.

## 2 Grundlagen der cyber-physischen Systeme in der Industrie 4.0

### 2.1 Begriffsklärung des cyber-physischen Systems

Um Bewertungen durchzuführen, bedarf es vorab der Grundlagenbetrachtung des Forschungsobjekts. Dazu wird in diesem Kapitel eine begriffliche Annäherung des Begriffs durchgeführt. In der Literatur existiert bislang keine einheitliche und allgemein anerkannte Definition für den Begriff des CPS. Je nach Forschungsgegenstand und -schwerpunkt variieren Beschreibungen, technischer Aufbau und Verständnis des Begriffs. Diskussionswürdig ist vor allem der Einbezug eines physischen Objektes oder Prozesses. Demnach lassen sich gegenwärtig zwei unterschiedliche Definitionsansätze gruppieren, die

1. CPS als Verbund aus physischen Objekt und eingebettetem System oder
2. CPS als eingebettetes System

deklarieren. Ein CPS kann aus einer Kombination aus physischen Objekt und eingebettetem System (1.) bestehen. Eine der ersten Beschreibungen liefert dazu LEE im Jahr 2006. Dieser Autor erklärt, dass CPS aus realen Prozessen bestehen, welche mit rechnergestützten und internetfähigen Funktionen ausgestattet sind. Integrierte Computer und globale Netzwerke überwachen und kontrollieren diese Prozesse.<sup>1</sup> Diese Meinung deckt sich mit jüngeren Auffassungen weiterer Autoren.<sup>2</sup> HELLMICH u. a. ergänzen, dass es sich bei physischen Prozessen ebenfalls um Objekte, wie bspw. Maschinen, handeln kann. Diese betiteln HELLMICH u. a. als „das mechanische Grundsystem“.<sup>3</sup> Die integrierte Komponente, auch eingebettetes System genannt, erweitert das physische Element um eine Kommunikations- und Steuerungssoftware, sodass infolgedessen das CPS eine intelligente, selbstständig handelnde Identität annimmt.<sup>4</sup> Der Schwerpunkt dieser Ansätze liegt in der Kopplung bestehender physischer Prozesse bzw. Objekte mit internetfähigen und global kommunizierenden Elementen, den eingebetteten Systemen. Die größte deutsche Forschungsstudie „agendaCPS“ hingegen ist der Auffassung, dass ein CPS vielmehr einem eingebetteten System (2.) gleicht, welches mittels Sensoren und Aktoren mit seiner realen Umwelt kommunizieren kann. Die Autoren gehen nicht explizit - wie bei vorherigen Erklärungen - auf physische Objekte ein. Die Neuerung bestehe vielmehr in der innovativen Software, ermöglicht durch die eingebetteten Systeme, welche eine globale Kommunikation realisieren.<sup>5</sup>

Gemeinsamer Konsens besteht in der Auffassung, dass ein CPS die physische mit der

---

<sup>1</sup>Vgl. LEE, E. A.: (Cyber-physical Systems), S.1.

<sup>2</sup>Vgl. DRATH, R.: (Grundlagen), S.20; KAGERMANN, H.: (Chancen), S.603.

<sup>3</sup>HELLMICH, A. u. a.: (Mehrwert), S.692.

<sup>4</sup>Vgl. ROTH, A.: (Einführung), S.23.

<sup>5</sup>Vgl. GEISBERGER, E.; BROY, M.: (agendaCPS), S.244; LÜTH, C.: (Funktion), S.26.

virtuellen Umgebung verbindet. Unklar bleibt weiterhin, ob es sich bei einem CPS lediglich um das eingebettete System oder den Verbund aus eingebettetem System und physischem Objekt handelt. Darüber hinaus ist zu erwähnen, dass CPS als Technologie<sup>6</sup> der I4.0 definiert werden.<sup>7</sup> Schlussfolgernd ist festzustellen, dass eine standardisierte Begriffsklärung zwingend notwendig ist, um die interdisziplinäre Forschung und Entwicklung von CPS zu gewährleisten.<sup>8</sup> Die vorliegende Arbeit folgt dem ersten Ansatz, sodass physische Objekte als Bestandteil des CPS in den folgenden Kapiteln berücksichtigt werden. Demnach lautet die Arbeitsdefinition wie folgt:

Ein CPS ist eine Technologie, die aus einem symbiotischen Verbund eines physischen Objekts mit einem integrierten eingebetteten System besteht, welches über ein globales digitales Netzwerk kommuniziert.

## 2.2 Einordnung in die Industrie 4.0

Der historische Werdegang der industriellen Revolutionen erstreckt sich vom 18. Jahrhundert bis zur Gegenwart, über die erste bis zur vierten Revolution und über die Massenfertigung bis hin zur individuellen Gestaltung neuartiger Produkte in automatisierten Fabriken. Die erste industrielle Revolution begann in den 50er Jahren des 18. Jahrhunderts mit der Entwicklung der ersten Dampfmaschine, die fortan Arbeiten in der Industrie erleichterten. Ungefähr 20 Jahre später folgte die zweite industrielle Revolution durch die Einführung der Massenproduktion unter Zuhilfenahme elektrischer Energie. Der dritte Umbruch, der gegenwärtig noch andauert, begann in den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts in Folge des Einsatzes von IKT, getrieben durch die neu genutzte Elektronik.<sup>9</sup> Die I4.0<sup>10</sup> reiht sich in die Geschichte der industriellen Revolution als neueste Entwicklung ein.<sup>11</sup> Sie wurde auf der Hannover Messe im Jahr 2011 erstmalig im Zusammenhang mit dem Projektvorhaben „Plattform Industrie 4.0“ der Bundesregierung vorgestellt.<sup>12</sup> Abbildung 2.1 gibt einen Überblick über den historischen Werdegang industrieller Revolutionen in Bezug zum Grad der Automatisierung, der im zeitlichen Verlauf stets zunimmt.

---

<sup>6</sup>Anmerkung: Unter Technologie werden u.a. Verfahren und Objekte verstanden, die technische und naturwissenschaftliche Zusammenhänge beinhalten, vgl. AMBERG, M.; BODENDORF, F.; MÖSLEIN, K. M.: (Wirtschaftsinformatik), S.33.

<sup>7</sup>Vgl. ROTH, A.: (Einführung), S.37.

<sup>8</sup>Vgl. BETTENHAUSEN, K. D.; KOWALEWSKI, S.: (Automation), S.7.

<sup>9</sup>Vgl. BAUERNHANSL, T.: (Weg), S.1 ff.; HEINZE, R.; MANZEI, C.; SCHLEUPNER, L.: (Kernkonzepte), S.10 f.; ROTH, A.: (Einführung), S.5.

<sup>10</sup>Anmerkung: Neben dem deutschen Begriff „Industrie 4.0“ entwickelten sich in den USA bzw. in Japan die Vereinigung „Industrial Internet Consortium (IIC)“ bzw. „Industrial Value-Chain Initiative (IVI)“, vgl. LANTERMANN, T.: (Initiative), S.142.

<sup>11</sup>Vgl. ROTH, A.: (Einführung), S.5.

<sup>12</sup>Vgl. KAGERMANN, H.; LUKAS, W.-D.; WAHLSTER, W.: (Weg), S.2; BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (BMWi): (Fortschrittsbericht), S.3.

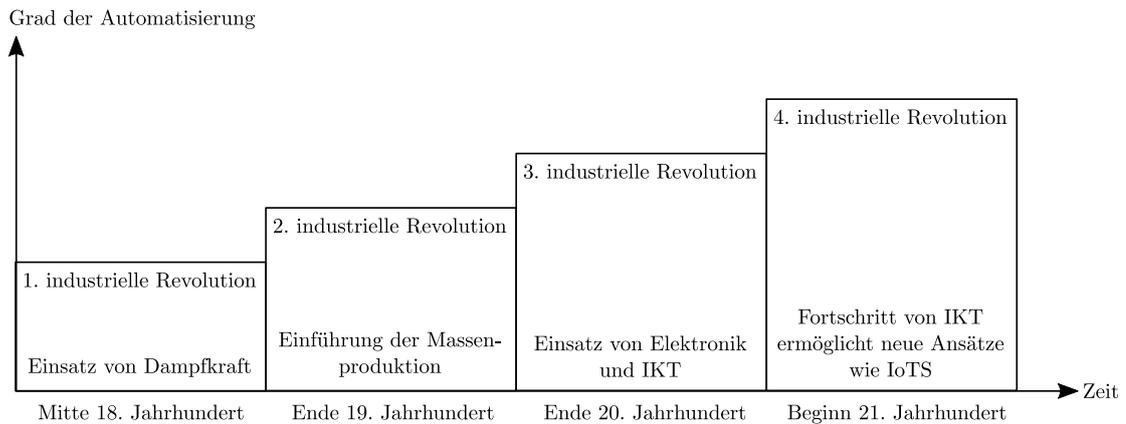


Abbildung 2.1: Historischer Abriss der industriellen Revolution, leicht modifiziert und in Anlehnung an SIEPMANN, S.19

Die I4.0 ist ein Bereich innerhalb des Internet of Things and Services (IoTS)), d.h. der Digitalisierung und Vernetzung von physischen und virtuellen Gegenständen über sämtliche Branchen und Wertschöpfungsketten. Dazu gehören ebenfalls die weiteren Bereiche Smart Grid, Smart Home, Smart Mobility, Smart Building und Healthcare.<sup>13</sup> Abbildung 2.2 gibt einen schematischen Überblick über die Vernetzung der Segmente. Sämtliche Bereiche stehen in Wechselbeziehung zu einander und können nicht losgelöst voneinander betrachtet werden. Der Schwerpunkt der I4.0 liegt auf der Autonomie und Digitalisierung der gesamten Industrie, d.h. innerhalb von ca. 15 Branchen. Die I4.0 deckt drei Schwerpunkte ab. Dazu gehören Smart Services (Entstehung neuer Geschäftsmodelle), Smart Products (Digitalisierung von Produkten und Dienstleistungen) und Smart Factory/Plant<sup>14</sup> (Digitalisierung und Inklusion von Wertschöpfungsketten).<sup>15</sup>

<sup>13</sup>Vgl. HEIDEL, R. u. a.: (Basiswissen), S.57.

<sup>14</sup>Anmerkung: Smart Factory steht stellvertretend für die Fertigungstechnik. Hingegen wird unter Smart Plant der industrielle Bereich der Verfahrenstechnik verstanden, vgl. HEIDEL, R. u. a.: (Basiswissen), S.3.

<sup>15</sup>Vgl. HEIDEL, R. u. a.: (Basiswissen), S.3.

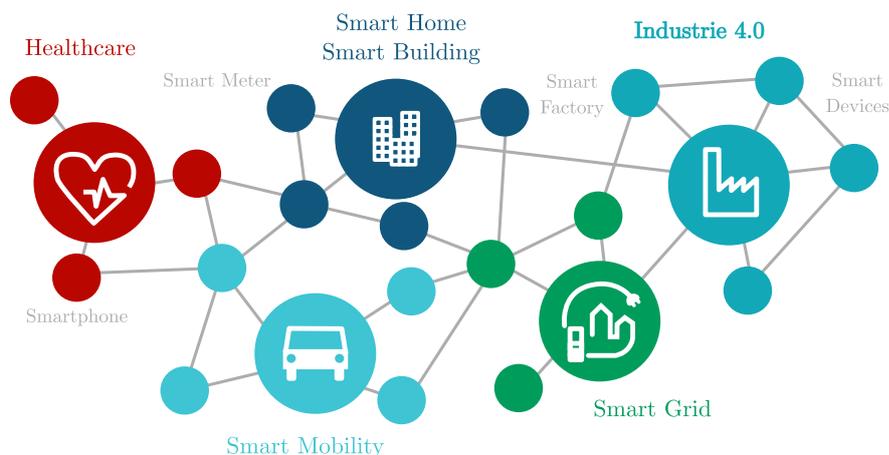


Abbildung 2.2: Überblick über IoTS, leicht modifiziert und in Anlehnung an HEIDEL u. a., S.58

Zur Thematik I4.0 existiert ein genormtes Referenzarchitekturmodell (vgl. Abbildung 2.3), in welches folgend CPS eingeordnet werden.<sup>16</sup> Dieses Konzept umfasst drei Achsen:<sup>17</sup>

1. Architektur: Beschreibung des Objektes in Bezug auf reale und digitale Welt
2. Hierarchie: Identifikation der internen und externen Vernetzung des Objektes mit weiteren Elementen
3. Lebenszyklus: Bezugnahme der Architektur und Hierarchie eines Objektes auf seinen kompletten Wertschöpfungszyklus

Wie aus Abbildung 2.3 hervor geht, wird die I4.0 durch mehrere Ebenen charakterisiert, die sich in reale und digitale Welt sowie die dazwischen liegende Digitalisierung aufteilen. Merkmal der I4.0 ist, dass physische Dinge aus der realen Welt mit all ihren Eigenschaften digitalisiert werden.<sup>18</sup> Es entsteht ein digitales Abbild. Genau dieser Vorgang wird durch CPS ermöglicht, da diese den Übergang von realer zur digitalen Welt ermöglichen. Konkret bedeutet dies, dass jeder Akteur und jedes Objekt mit jedem anderen beliebigen Teilnehmer digital verbunden ist und zusätzlich in einem Wertschöpfungsnetz kommunizieren kann. Die Neuerung besteht darin, dass unter Akteuren und Objekten ebenfalls u.a. Maschinen und Anlagen verstanden werden. In der Produktionsumgebung sammeln bspw. Arbeitsgeräte prozessrelevante Informationen und stellen sie anderen CPS oder Menschen zur Verfügung.

<sup>16</sup>Vgl. HEIDEL, R. u. a.: (Basiswissen), S.38 ff.

<sup>17</sup>Vgl. ebenda, S.41.

<sup>18</sup>Vgl. SIEPMANN, D.: (Paradigmen), S.42.

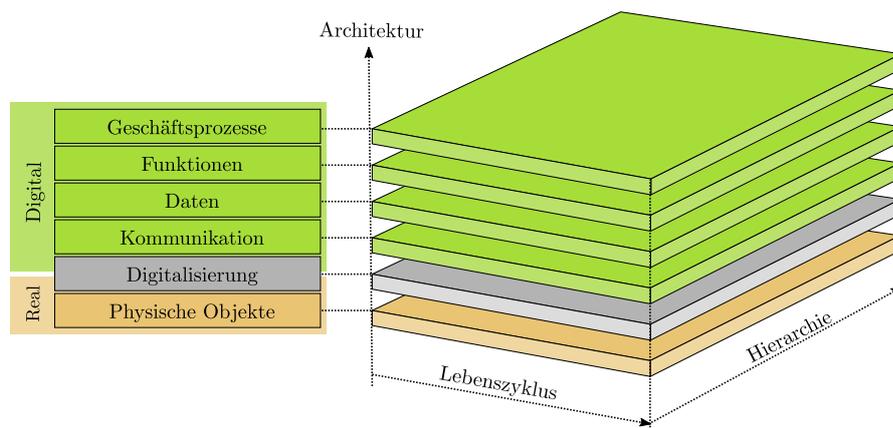


Abbildung 2.3: Referenzarchitekturmodell, modifiziert und in Anlehnung an HEIDEL u. a., S.41

Infolgedessen gehören CPS zu den fünf Paradigmen, die die Neuerungen der I4.0 definieren.<sup>19</sup> Sie sind somit für den langfristigen und umfassenden Fortschritt der vierten industriellen Revolution unabdinglich.<sup>20</sup> Anzumerken ist, dass informationsverarbeitende, automatisierte und physische Gesamteinheiten bereits seit den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts, d.h. seit der dritten industriellen Wende, existieren.<sup>21</sup> Der wesentliche Unterschied zwischen der dritten und vierten Revolution besteht darin, dass Gesamtsysteme neuerdings über die Unternehmensgrenzen hinaus und über die komplette Wertschöpfungskette hinweg miteinander kommunizieren können, d.h. der Datenaustausch erfolgt nicht mehr lediglich intern über das Intranet, sondern global über das Internet.<sup>22</sup>

## 2.3 Technischer Aufbau und Charakteristika

Vorab ist hervorzuheben, dass in der vorliegenden Arbeit zwischen zwei differenten Aufbauarten unterschieden wird (vgl. Abbildung 2.4). Einerseits wird die historisch bedingte Aufrüstung von bestehenden Objekten zu CPS (1.) betrachtet.<sup>23</sup> Andererseits stehen gegenwärtig vollkommene Lösungen (2.) zur Verfügung, die bereits sämtliche Bestandteile beinhalten, die für ein CPS notwendig sind. Diese differenzierte Betrachtung ist für die Bewertungsansätze in den folgenden Kapiteln von großer Bedeutung, da sich grundlegende Informationen, wie z.B. die Nutzungsdauer der einzelnen Komponenten, erheblich unterscheiden. Wie bereits in Kapitel 2.1 angedeutet, besteht ein CPS aus einem phy-

<sup>19</sup>Anmerkung: Die vier weiteren Paradigmen sind: vertikale/horizontale Integration, dezentrale Intelligenz und Steuerung sowie digitales Engineering, vgl. SIEPMANN, D.: (Grundlagen), S.37 ff.

<sup>20</sup>Vgl. SIEPMANN, D.: (Paradigmen), S.37.

<sup>21</sup>Vgl. BETTENHAUSEN, K. D.; KOWALEWSKI, S.: (Automation), S.2; PLATTFORM INDUSTRIE 4.0: (RAMI), S.3.

<sup>22</sup>Vgl. BETTENHAUSEN, K. D.; KOWALEWSKI, S.: (Automation), S.3; PLATTFORM INDUSTRIE 4.0: (RAMI), S.4.

<sup>23</sup>Vgl. DROSSEL, W.-G. u. a.: (Systeme), S.200.

sischen Objekt und einem eingebetteten System.<sup>24</sup> Das *physische Objekt* ist der reale Bestandteil des CPS. Es kann, je nach Einsatzgebiet und -schwerpunkt, unterschiedliche Gestalt annehmen. Jedoch besitzen physischen Objekte - unabhängig von ihrem Einsatz - mindestens einen ausführenden Part. Dieser wird als *Aktor*, d.h. als ein technisches Element, verstanden.<sup>25</sup> Dieses Bauteil ist dafür verantwortlich Vorgänge auszuführen. Diese können je nach Funktion des physischen Objektes variieren. Es kann sich bspw. um (elektro)mechanische, optische oder thermische Vorgänge handeln.<sup>26</sup> Darüber hinaus gehört zur Ausstattung eines physischen Objektes mindestens ein *Sensor*. Diese Komponente ist für die Funktionsweise eines CPS unabdingbar, da sie interne und externe Reize wahrnimmt. Die sensorischen Bauteile können ebenfalls ein Bestandteil des eingebetteten Systems darstellen. Sie werden in interne und externe Sensoren unterschieden.<sup>27</sup> Die externe Sensorik steht mit der Umgebung der realen Einheit in Verbindung und nimmt ausgewählte Umweltzustände, bspw. optische, akustische und bildverarbeitende Reize, wahr. Interne Sensoren beziehen sich hingegen auf innere Zustände des physischen Objekts.<sup>28</sup> Das *eingebettete System* stellt die funktionale und intelligente Einheit (2.) dar. Es ist mit seinen Subsystemen unabdingbar für die Funktionsweise eines CPS. Die intelligente Einheit besteht einerseits aus *Hardware*, dem Mikrocontroller. Dieser inkludiert die *Softwarekomponente*.<sup>29</sup> Dies ist ein Rechnersystem, welches Daten in seiner Gesamtheit steuert, speichert, verwaltet, kontrolliert und über Schnittstellen mit Menschen und/oder anderen (cyber-physischen) Objekten interagieren kann.<sup>30</sup> Des Weiteren existieren *Mensch-Maschine- bzw. Maschine-Maschine-Schnittstellen*, die eine Vernetzung mit Menschen bzw. Maschinen untereinander ermöglicht. Erstere interagieren bspw. über Touch-Displays, Gestik oder Sprachsteuerung.<sup>31</sup> Mehrere CPS vernetzen sich untereinander mittels standardisierter Protokolle.

Die Unterschiede zwischen den zwei Aufbauarten liegen erstens in den verwendeten Steuersystemen. Bei bereits bestehenden physischen Objekten (1.) ist eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) integriert.<sup>32</sup> Diese ist als Steuereinrichtung zu verstehen und dafür zuständig, die zuvor vom Entwickler programmierten und gespeicherten Algorithmen anzuwenden und auszuführen.<sup>33</sup> Dabei liest die SPS die Sensorikdaten aus und gibt Befehle an die Aktorik weiter.<sup>34</sup> Ein neuartig entwickeltes CPS (2.) kommt ohne eine SPS aus. Die Steuereinheit befindet sich im Mikrocontroller des eingebetteten

---

<sup>24</sup>Vgl. LÜTH, C.: (Funktion), S.28; QUINT, F.: (Referenzarchitektur), S.31 ff.; GEISBERGER, E.; BROY, M.: (agendaCPS), S.22.

<sup>25</sup>Vgl. LÜTH, C.: (Funktion), S.28; QUINT, F.: (Referenzarchitektur), S.31 ff.; BAUERNHANSL, T.: (Weg), S.15 ff.

<sup>26</sup>Vgl. GEISBERGER, E.; BROY, M.: (agendaCPS), S.22; BROY, M.: (Innovation), S.22 ff.

<sup>27</sup>Vgl. HESSE, S.; SCHNELL, G.: (Fabrikautomation), S.6 ff.

<sup>28</sup>Vgl. ebenda, S.6.

<sup>29</sup>Vgl. HOFMANN, J.: (Produktion), S.57 ff.; ROY, D. T.: (Smart Factory), S.51.

<sup>30</sup>Vgl. BRINKSCHULTE, U.; UNGERER, T.: (Mikrocontroller), S.73 ff.

<sup>31</sup>Vgl. BAUERNHANSL, T.: (Weg), S.16.

<sup>32</sup>Vgl. HELLMICH, A. u. a.: (Mehrwert), S.695.

<sup>33</sup>Vgl. SCHLICK, J. u. a.: (Anwendung), S.72.

<sup>34</sup>Vgl. SEITZ, M.: (Steuerungen), S.21 f.

Systems. Zweitens ist in neuartigen CPS-Lösungen (2.) bereits ein eingebettetes System verbaut. Hingegen müssen bestehende physische Objekte (1.) erst umgerüstet werden, um folglich eine intelligente Einheit zu integrieren.<sup>35</sup> Parallel dazu können zur Aufrüstung bei Bedarf weitere Komponenten, wie z.B. spezifische Sensoren, eingebaut werden, die zur Datenansammlung opportun sind. Drittens resultieren aus den verschiedenen Anschaffungszeitpunkten der Komponenten differente Betriebszeiten, d.h. Nutzungsdauern. Gem. VOGEL-HEUSER; DIEDRICH; BROY wird von folgenden Betriebszeiten ausgegangen:<sup>36</sup>

- Physisches Objekt: 5 - 25 Jahre
- Hardware des eingebetteten Systems: 5 - 10 Jahre
- Software des eingebetteten Systems: 6 - 12 Monate

Mit diesen Informationen lassen sich die unterschiedlichen Nutzungsdauern und -anfänge der Komponenten verdeutlichen.<sup>37</sup> Die Nutzungsdauern sind als Klassen, d.h. Zeitspannen, angegeben. Die Klassenmitte  $x_i$  lässt sich wie folgt berechnen:<sup>38</sup>

$$x_i = \frac{1}{2} \cdot (x_i^u + x_i^o) \quad (2.1)$$

mit folgenden Indizes und Parametern:

- $i$  = Klasse  $i$
- $x_i$  = Klassenmitte
- $x_i^u$  = Untergrenze der Klasse  $i$
- $x_i^o$  = Obergrenze der Klasse  $i$

Die Klassenmitte, d.h. die angenommene durchschnittliche Nutzungsdauer, beträgt für das physische Objekt 15 Jahre, für die Hardware bzw. Software des eingebetteten Systems 7,5 bzw. 0,75 Jahre. In diesen 15 Jahren wird die Hardware des eingebetteten Systems zwei mal und die Software 20 mal erneuert bzw. angeschafft. Im Fall einer vollkommenen CPS-Lösung (2.) beginnen die drei Komponenten ihre Nutzung im gleichen Zeitpunkt ( $t=0$ ), da sie in einem System zusammen agieren (vgl. Abbildung 2.4). Hingegen sind bestehende physische Objekte (1.) bereits für einen gewissen Zeitraum im Einsatz. Erst nachträglich werden Hard- und Software der funktionalen Einheit integriert. Daraus folgt, dass das physische Objekt eine Restlaufzeit besitzt und das eingebettete System zum späteren Zeitpunkt seine Nutzung beginnt.<sup>39</sup> In Abbildung 2.4 wird eine durchschnittliche Restlaufzeit von 7,5 Jahren unterstellt.

<sup>35</sup>Vgl. DROSSEL, W.-G. u. a.: (Systeme), S.201.

<sup>36</sup>Vgl. VOGEL-HEUSER, B.; DIEDRICH, C.; BROY, M.: (Anforderungen), S.671.

<sup>37</sup>Anmerkung: Es wird angenommen, dass die Betriebszeiten für Sensoren und Aktoren in der Hardware des eingebetteten Systems inkludiert sind.

<sup>38</sup>Vgl. BLEYMÜLLER, J. u. a.: (Statistik), S.12.

<sup>39</sup>Anmerkung: Über die Sinnhaftigkeit einer Investition bei geringerer Restlaufzeit wird an späterer Stelle dieser Arbeit (vgl. Kapitel 4, Ersatz- und Investitionszeitpunkt) diskutiert.

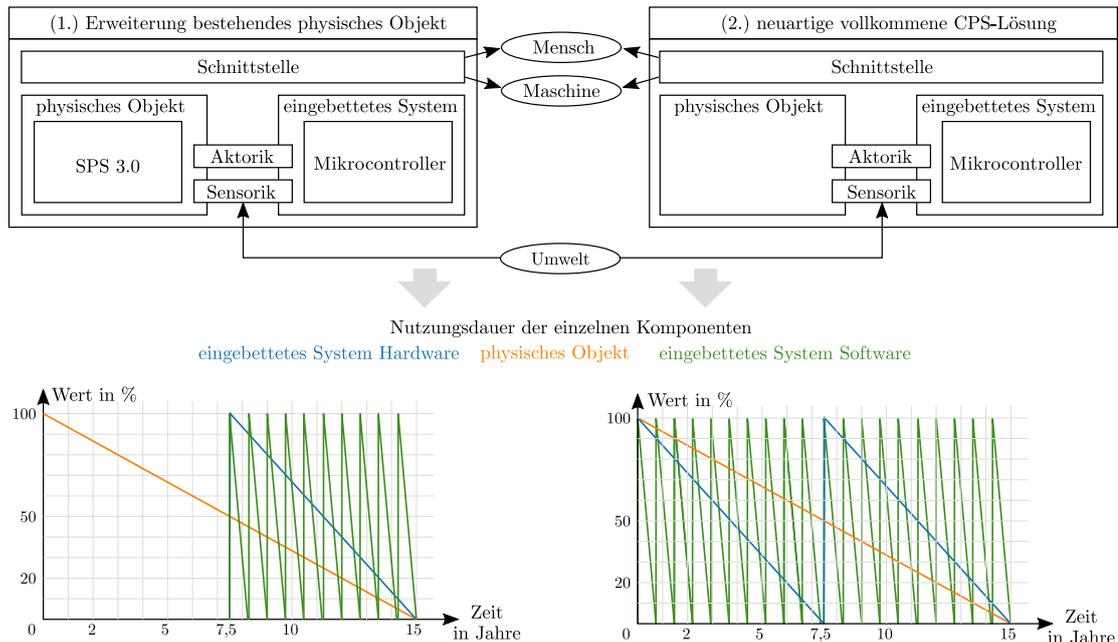


Abbildung 2.4: Systematischer Aufbau und Nutzungsdauer einzelner Komponenten des CPS, eigene Darstellung

Das eingebettete System mit seinen Komponenten muss im Anschluss so flexibel gebaut und programmiert werden, dass es den bestehenden Anforderungen des physischen Objekts genügt. Schlussfolgernd kann gesagt werden, dass der Aufbau eines CPS einerseits sehr individuell gestaltet werden kann. Andererseits besitzt der Verbund aus Hard- und Software signifikante Mindestbestandteile: das physische Objekt und das eingebettete System. Aus den zuvor beschriebenen spezifischen Aufbauarten und der Funktionsweise ergeben sich charakteristische Eigenschaften, die auf sämtliche CPS zutreffen:<sup>40</sup>

- Erfassung von internen und externen Reizen mittels Sensorik
- Teilweise oder vollständig selbstbestimmte, vorausschauende, geplante Reaktionen mittels Aktorik in komplexen Situationen
- Sammlung, Speicherung, Analyse und autonome Auswertung erfasster Daten in Echtzeit
- Interaktions- und Kommunikationsmöglichkeiten mit Mensch und weiteren CPS
- Nutzung globaler Daten über das Internet entlang der gesamten Wertschöpfungskette
- Besitz der Fähigkeit zum selbstständigen Lernen
- Auslegung auf Langzeitbetrieb

<sup>40</sup>Vgl. DROSSEL, W.-G. u. a.: (Systeme), S.198; GEISBERGER, E.; BROY, M.: (agendaCPS), S.60, 127 ff.

## 2.4 Herausforderungen und Potenziale

Die evolutionäre Entwicklung von CPS stellt Unternehmen einerseits vor signifikante Herausforderungen. Andererseits implizieren sie ebenfalls herausragende Möglichkeiten und Potenziale. CPS werden vielfach als soziotechnische Systeme bezeichnet, da sie u.a. soziale und technische Segmente tangieren.<sup>41</sup> Dieser Arbeit wird zugrunde gelegt, dass Technik als Wegbereiter von CPS gilt. Dies bedeutet konkret, dass technische Herausforderungen und Chancen abseits dieser der Arbeit zugrunde liegenden Forschungsfragen analysiert und beantwortet werden.<sup>42</sup> Parallel zum sozialen Part erstrecken sich die Auswirkungen dieser technischen Errungenschaft bis in die Bereiche der Ökonomie und Ökologie.<sup>43</sup> Zusammengefasst ergeben sich soziale, ökologische und ökonomische Wirkungsbereiche, die folgend näher untersucht werden.

CPS stellen Unternehmen vor Herausforderungen, die es zukünftig zu bewältigen gilt. Von großer Bedeutung sind Risiken der *Betriebssicherheit*.<sup>44</sup> Diese entstehen aus dem Systemverhalten von CPS und stellen eine sozial-ökonomische Herausforderung dar. CPS agieren zunehmend autonom und nach technologisch angelernten Gesetzen, die menschliches soziales Verhalten nicht inkludieren. Daraus folgt, dass am Prozess beteiligte Personen oftmals Entscheidungen, Steuerungen und Handlungen des CPS nicht nachvollziehen können. Aufgrund dieser Intransparenz, sowohl auf Seite des CPS als auch seitens des Benutzers, werden Entscheidungen auf Grundlage unsicheren Wissens gefällt. Dies führt ggf. zu nicht optimalen Situationen, die den betrieblichen Ablauf einschränken.<sup>45</sup> Die intransparente Handlungsabfolge des CPS führt zu *Akzeptanzproblemen* seitens der Gesellschaft, v.a. aber der Menschen, die mit CPS arbeiten und kooperieren. Die Mensch-Maschine-Interaktion gilt folglich als ein essentieller Schwerpunkt des sozialen Forschungsbereiches, da mit ihr die Einsatzbereitschaft der cyber-physischen Technologie stagnieren oder vorangetrieben werden kann. Fehlendes Verständnis für CPS kann bei Nutzern zu Überforderung, Stress bis hin zu einer kognitiven Dissonanz führen.<sup>46</sup> Durch die Ansammlung, Analyse und Auswertung zahlreicher Daten im CPS und Internet befürchten Nutzer einen Einschnitt in ihre Privatsphäre, da das Ausmaß und die Art der personenbezogenen Daten zumeist intransparent bleiben.<sup>47</sup> Diese Bedenken der Mitarbeiter führen ebenfalls zu Akzeptanzproblemen. Eine Möglichkeit zur Abwendung dieser Problematik ist die Einhaltung von Schutzziele der

---

<sup>41</sup>Vgl. GEISBERGER, E.; BROY, M.: (agendaCPS), S.17 f.; BROY, M.: (Innovation), S.21 f.

<sup>42</sup>Anmerkung: Forschungslücken existieren bspw. in der Entwicklung von exakten Methoden und Modellen zur Auswertung von Umgebungsparametern, sowie in der Beherrschung des Zusammenspiels von physischen Objekt, Software und Internet, vgl. BETTENHAUSEN, K. D.; KOWALEWSKI, S.: (Automation), S.3 und GEISBERGER, E.; BROY, M.: (agendaCPS), S.170.

<sup>43</sup>Vgl. GEISBERGER, E.; BROY, M.: (agendaCPS), S.17 f.; BROY, M.: (Innovation), S.21 f.

<sup>44</sup>Vgl. BROY, M.: (Innovation), S.22; GEISBERGER, E.; BROY, M.: (agendaCPS), S.106.

<sup>45</sup>Vgl. GEISBERGER, E.; BROY, M.: (agendaCPS), S.106 f.

<sup>46</sup>Anmerkung: Als kognitive Dissonanz werden mehrere störende Empfindungen, bspw. Wahrnehmungen, Einstellungen und Absichten, bezeichnet, die für Personen nicht miteinander kompatibel sind, vgl. FESTINGER, L.: (dissonance), S.4 f.

<sup>47</sup>Vgl. GEISBERGER, E.; BROY, M.: (agendaCPS), S.111.

IT-Sicherheit.<sup>48</sup> Anzumerken ist, dass im logistischen und produktionsnahen Umfeld die Relevanz des privaten Datenschutzes weniger stark ausgeprägt ist, da primär Informationen über Prozesse, Maschinen und Objekte gesammelt werden.<sup>49</sup> Ungeachtet dessen sind Unternehmen dazu verpflichtet, das Bundesdatenschutzgesetz (BDSG) einzuhalten und die Persönlichkeitsrechte jedes Einzelnen zu wahren.<sup>50</sup> Darüber hinaus müssen *Gesetze* hinsichtlich Haftung und Verantwortung im Kontext fehlerhafter Entscheidungen des CPS neu diskutiert werden.<sup>51</sup> Ebenso existieren gegenwärtig keine Vorgaben oder Gesetzlichkeiten zur Regulierung von CPS in Bezug auf die Ökologie. Die Gesetze sind folglich Bestandteil sozialer, ökologischer und ökonomischer Herausforderungen. Auffallend ist, dass ökologische Herausforderungen - im Vergleich zu sozialen und ökonomischen Problemstellungen - in der Literatur am wenigsten oder gar nicht beschrieben werden. Ebenso verhält es sich auf der allgemeineren Analyseebene der I4.0, in welche CPS (hier) eingegliedert sind. Ökologische Nutzenpotenziale werden gegenwärtig stärker hervorgehoben als deren Herausforderungen.<sup>52</sup> Dafür kommen gem. ZITZMANN; KARL; HIRSCHNER zwei Begründungen in Betracht.<sup>53</sup> Erstens steckt die Forschung der I4.0 noch in den Anfängen, sodass eine interdisziplinäre ökologische Betrachtung bislang nicht ausgereift ist. Zweitens sollten zunächst konkrete ökologische Rahmenbedingungen der Politik geschaffen werden, um diese dann auf I4.0 und seine Bestandteile zu übertragen.<sup>54</sup> Ein möglicher ökologisch-ökonomischer Ansatzpunkt kann der optimale Investitionszeitpunkt bei Ablösung alter Komponenten durch neue cyber-physische Bauteile darstellen.<sup>55</sup> Als Beispiel dafür stehen betriebliche Sensorbauteile. Diese müssen bei Weiterbetrieb einer Altanlage mit neuen, smarten Sensoren gekoppelt werden, die die cyber-physische Funktionalität unterstützen. Diese symbiotische Vereinigung kann sehr zeitaufwändig und kostenintensiv sein. Fraglich ist, ob es sinnvoll erscheint, die bestehenden Sensoren zu entsorgen und komplett auf neuwertige Sensorik umzusteigen oder bestehende Sensoren nachzurüsten. Des Weiteren führt GEISBERGER; BROY an, dass stark ökonomischer Forschungsbedarf in der Ausgestaltung und Entwicklung existenter *Geschäftsmodelle* besteht.<sup>56</sup> Durch Integration von CPS können sich v.a. Prozesse und Wertschöpfung von Produkten und Dienstleistungen ändern, die durch das Management des Unternehmens identifiziert und bewertet werden sollten. Außerdem werden Unternehmen gegenwärtig damit konfrontiert interne *Softwarekompetenzen* aufzubauen, um CPS zu integrieren und weiterhin konkurrenzfähig zu bleiben. Dies bedeutet, dass Personal zielführend weitergebildet wird oder/und neue Mitarbeiter mit geeigne-

---

<sup>48</sup>Anmerkung: Dazu gehören u.a. Vertraulichkeit, Integrität und Verfügbarkeit, vgl. GEISBERGER, E.; BROY, M.: (agendaCPS), S.124.

<sup>49</sup>Vgl. GEISBERGER, E.; BROY, M.: (agendaCPS), S.118.

<sup>50</sup>Vgl. ebenda; BUNDESREGIERUNG DEUTSCHLAND: (Verordnung), S.2116.

<sup>51</sup>Vgl. GEISBERGER, E.; BROY, M.: (agendaCPS), S.110.

<sup>52</sup>Vgl. ZITZMANN, I.; KARL, D.; HIRSCHNER, S.: (Nachhaltigkeitsaspekte), S.487.

<sup>53</sup>Vgl. ebenda.

<sup>54</sup>Vgl. ebenda.

<sup>55</sup>Vgl. GEISBERGER, E.; BROY, M.: (agendaCPS), S.128.

<sup>56</sup>Vgl. ebenda S.158.; BETTENHAUSEN, K. D.; KOWALEWSKI, S.: (Automation), S.8.

ten Fähigkeiten eingestellt werden. Softwarekompetenzen betreffen folglich den sozialen Bereich. Vor allem industrielle, mittelständische Betriebe haben Schwierigkeiten sich der Digitalisierung zu öffnen und sich vom handwerklich geprägten zu einem durch künstliche Intelligenz gesteuerten Unternehmen zu wandeln.<sup>57</sup> Softwaretechnologie und -kompetenz gelten jedoch als entscheidende Erfolgsfaktoren, um den Unternehmensbestand aufrechtzuerhalten.<sup>58</sup> Folglich bedarf es zukünftig weiterer Methoden, Modelle und Technologien zum Umgang und zur Implementierung der enormen Datenansammlung in Wertschöpfungsnetzen und Unternehmen. In diesem Zusammenhang ist es sehr wichtig zu klären, wie *Kosten und Erlöse entlang der Wertschöpfungsketten* aufgeteilt werden.<sup>59</sup> Unabdingbare Voraussetzungen dafür sind Informationen des Lebenszyklusmanagements aller physischen und digitalen Bestandteile, die am wertschöpfenden Prozess beteiligt sind.<sup>60</sup> Um diese Daten zu erheben, bedarf es einer Zusammenführung heterogener Lebenszyklen der Komponenten sowie einer anschließenden ausführlichen *Bewertung von CPS und seiner Komponenten*.<sup>61</sup> Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Minderung und Elimination der Herausforderungen ausschließlich bewerkstelligt werden können, indem eine interdisziplinäre Forschung angestrebt und umgesetzt wird.

Neben zuvor beschriebenen Herausforderungen gewähren CPS zahlreiche Potenziale, die deren Integration lohnend erscheinen lassen. Der soziale Mehrwert umfasst die *Unterstützung und Assistenz* der beteiligten Personen durch CPS. Zum Beispiel übernehmen CPS als fahrerlose Transportsysteme (FTS) Bring- und Holddienste in der Intralogistik, um den Mitarbeiter zu entlasten.<sup>62</sup> FTS kommunizieren selbstständig über das Internet miteinander und finden automatisch den kürzesten und schnellsten Weg vom und zum Mitarbeiterplatz.<sup>63</sup> CPS, in Gestalt von Robotern, werden gegenwärtig bereits in smarten Fabrikumgebungen für schwierige oder/und gesundheitsschädliche Arbeiten eingesetzt, die zuvor Arbeitnehmer leisteten.<sup>64</sup> Aus den genannten Aspekten erhöht sich zum einen der *Komfort und die Sicherheit* der Mitarbeiter.<sup>65</sup> Zum anderen minimieren sich *Gesundheitsrisiken*, welchen Arbeitnehmer in komplexen Arbeitsumgebungen ausgesetzt sind.<sup>66</sup> Ökologisch-ökonomische Chancen bestehen vor allem im niedrigeren *Ressourcenverbrauch*, der durch intelligente Entscheidungen des CPS zustande kommt. Stellvertretend dafür stehen smarte Energieversorgungssysteme, auch SmartGrid genannt.<sup>67</sup> Bezogen auf Unternehmen und Industrieanlagen ist häufig auch

---

<sup>57</sup>Vgl. GEISBERGER, E.; BROY, M.: (agendaCPS), S.175.

<sup>58</sup>Vgl. ebenda.

<sup>59</sup>Vgl. BETTENHAUSEN, K. D.; KOWALEWSKI, S.: (Automation), S.6 f.

<sup>60</sup>Vgl. GEISBERGER, E.; BROY, M.: (agendaCPS), S.159.

<sup>61</sup>Vgl. BETTENHAUSEN, K. D.; KOWALEWSKI, S.: (Automation), S.3.

<sup>62</sup>Vgl. SCHLICK, J. u. a.: (Anwendung), S.63 ff.

<sup>63</sup>Vgl. BRINZER, B.; BANERJEE, A.: (Komplexitätsbewertung), S.342.

<sup>64</sup>Vgl. STEEGMÜLLER, D.; ZÜRN, M.: (Automobilbau), S.103 ff.

<sup>65</sup>Vgl. HELLMICH, A. u. a.: (Mehrwert), S.692.

<sup>66</sup>Vgl. GEISBERGER, E.; BROY, M.: (agendaCPS), S.109; BROY, M.: (Innovation), S.30; BETTENHAUSEN, K. D.; KOWALEWSKI, S.: (Automation), S.5.

<sup>67</sup>Vgl. GEISBERGER, E.; BROY, M.: (agendaCPS), S.49 ff.

von Micro-Grid-Konzepten die Rede.<sup>68</sup> Diese sind dafür zuständig, den Energiebedarf mit lokalem Strom zu steuern und zu decken. Dadurch werden lange Energietransportemüngen und ein bedeutender Beitrag zu einer umweltschonenden Energieerzeugung geleistet.<sup>69</sup> Des Weiteren ist es möglich, den vermehrt aufkommenden *ökologischen Produktanforderungen* der Kunden nachzukommen. So können CPS die für ein Produkt benötigten Materialien nach ökologischen Kriterien, bspw. nach Emissionsausstoß, auswählen und produzieren. Dieses Potenzial betrifft folglich Ökologie und Ökonomie gleichermaßen.<sup>70</sup> Zu den ökonomischen Vorteilen gehört die Möglichkeit zur *Steigerung der Wirtschaftlichkeit* eines Unternehmens. Dies ist die Auswirkung des effizienteren Einsatzes der Produktionsfaktoren (u.a. Werkstoffe und Betriebsmittel) mit Hilfe von CPS, wodurch eine Kostensenkung durch einen niedrigeren Ressourcenverbrauch zustande kommt.<sup>71</sup> Des Weiteren sind Kostensenkungen möglich, indem bspw. vor- und nachgelagerte Wertschöpfungsstufen optimiert werden. Instandhaltungskosten werden u.a. durch softwaretechnische Komponenten zur Selbstdiagnose verringert.<sup>72</sup> Gemeinsamer Konsens herrscht in der Literatur darüber, dass der Einsatz von CPS eine verbesserte *Flexibilität* in sämtlichen Bereichen mit sich bringt. Prozesse können schneller angepasst werden, indem CPS durch ihr autonomes Verhalten und Handeln zügig auf veränderte Umweltzustände reagieren. Daraus folgt eine flexiblere Anpassung an Kundenanforderungen bis hin zur individuellen Massenfertigung.<sup>73</sup> VEIGT u. a. führen an, dass dies bspw. im Umgang mit Eilaufträgen in der Produktion von großer Bedeutung ist.<sup>74</sup> CPS sind in der Lage betriebsinterne Abläufe so zu koordinieren, dass Produkte mit hoher Priorität und in kleiner Losgröße bevorzugt gefertigt werden. Hinzu kommt die Fähigkeit zur überbetrieblichen Kommunikation von CPS. Diese ermöglicht eine autonome Verständigung mit Logistikdienstleistern, um Anlieferung und Abholung termingerecht zu vereinbaren.<sup>75</sup> In Folge der Funktionalität der CPS ist es möglich, eine bessere Planung, Steuerung und Kontrolle im Unternehmen zu vollziehen, indem sofort Aussagen über den aktuellen Status der Produktion anhand von Echtzeitdaten abgerufen werden können.<sup>76</sup> Die gelisteten Potenziale führen dazu, dass CPS im Kontext der Industrie 4.0 dazu beitragen, die *Kreislauffähigkeit* innerbetrieblicher Prozesse und Abläufe zu erhöhen. Die über das CPS gesammelten Daten zu Prozessen und daraus resultierenden Produkten können in Datenmanagementsystemen aggregiert und ausgewertet werden. Zum Beispiel kann das Umwelt- und Energiemanagement eines Unternehmens durch CPS transparenter gestaltet und Optimierungsmaßnahmen abgeleitet werden. Darüber

---

<sup>68</sup>Vgl. ebenda, S.49.

<sup>69</sup>Vgl. GEISBERGER, E.; BROY, M.: (agendaCPS), S.52.

<sup>70</sup>Vgl. ebenda, S.55.

<sup>71</sup>Vgl. HEINZE, R.; MANZEI, C.; SCHLEUPNER, L.: (Kernkonzepte), S.12; BETTENHAUSEN, K. D.; KOWALEWSKI, S.: (Automation), S.3.

<sup>72</sup>Vgl. HEINZE, R.; MANZEI, C.; SCHLEUPNER, L.: (Kernkonzepte), S.5.

<sup>73</sup>Vgl. ebenda, S.12; BETTENHAUSEN, K. D.; KOWALEWSKI, S.: (Automation), S.5.

<sup>74</sup>Vgl. VEIGT, M. u. a.: (Entwicklung), S.18.

<sup>75</sup>Vgl. ebenda; HELLMICH, A. u. a.: (Mehrwert), S.693.

<sup>76</sup>Vgl. ebenda.

hinaus können Recyclingprozesse verbessert und damit eventuelle Stoffströme geschlossen werden. Zusammengefasst ergeben sich für Unternehmen zahlreiche Chancen und Herausforderungen entlang der gesamten Wertschöpfungsketten.

# 3 Grundlagen der nachhaltigkeitsbezogenen Bewertung

## 3.1 Begriffsklärung der Nachhaltigkeit

Neben der evolutionären Entwicklung von CPS 2 gewinnt der Megatrend der Nachhaltigkeit immer mehr an betrieblicher Relevanz. Signifikante Aufmerksamkeit erreichte der Begriff der Nachhaltigkeit erstmals durch die Veröffentlichung des Werkes „Sylvicultura Oeconomica“ im Jahr 1713.<sup>1</sup> In diesem forderte der Autor CARLOWITZ eine „nachhaltende Nutzung des Waldes“.<sup>2</sup> Nachhaltigkeit steht in diesem Zusammenhang mit der intelligenten Bewirtschaftung von Bäumen, d.h. die Ressource Holz sollte nur genutzt werden, wenn sie langfristig erhalten bleibt. Dies lässt darauf schließen, dass der damalige Begriff der Nachhaltigkeit in seiner Allgemeinheit ein natürliches System meint, welches ausschließlich nur genutzt werden darf, wenn es regenerierbar ist und in seinem Bestand und seinen Eigenschaften nicht eingeschränkt wird.<sup>3</sup> In den 1970er Jahren veröffentlichten MEADOWS u. a. einen Bericht zur aktuellen Situation über den Ressourcenverbrauch auf der Erde.<sup>4</sup> Durch die zahlreichen Druckauflagen des Werkes und der daraus resultierenden internationalen Präsenz vollzog sich ein begrifflicher Wandel. Wissenschaftler erkannten die Notwendigkeit, mehrere wissenschaftliche Disziplinen miteinander zu vereinen, um langfristig den Fortbestand natürlicher Systeme zu sichern. Infolgedessen inkludierte der Begriff ökologische, ökonomische und soziale Sichtweisen.<sup>5</sup> Durch das im Jahr 1987 erarbeitete Leitbild zur nachhaltigen Entwicklung im Brundtland-Bericht<sup>6</sup> festigte sich weltweit die Notwendigkeit eines nachhaltigen Handelns und Strebens.<sup>7</sup> Im Jahr 2002 veröffentlichte die BUNDESREGIERUNG DEUTSCHLAND eine nationale Nachhaltigkeitsstrategie, in der sie sich zur nachhaltigen Vorgehensweise bekennt.<sup>8</sup> Im Jahr 2015 folgte die „Agenda 2030“, eine weltweite Vereinbarung zum nachhaltigen Fortbestand der Erde. Dieses Konzept gilt als bedeutender internationaler Meilenstein der jüngsten Geschichte.<sup>9</sup> Zusammenfassend wird festgehalten, dass der Begriff Nachhaltigkeit eine ökonomische, soziale und ökologische Sichtweise inkludiert, um den Fortbestand natürlicher Systeme zu wahren.

---

<sup>1</sup>Vgl. CARLOWITZ, H.-C. v.: (Oeconomica), S.105 f.

<sup>2</sup>Ebenda, S.105.

<sup>3</sup>Vgl. PUFÉ, I.: (Nachhaltigkeit), S.37.

<sup>4</sup>Vgl. MEADOWS, D. L. u. a.: (Grenzen), S.17 ff.

<sup>5</sup>Vgl. PUFÉ, I.: (Nachhaltigkeit), S.39 f.

<sup>6</sup>Anmerkung: Der Brundlandt-Bericht wurde von der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung entworfen und gilt als bedeutender Wegbereiter nachhaltigen Wirtschaftens.

<sup>7</sup>Vgl. PUFÉ, I.: (Nachhaltigkeit), S.42 ff.

<sup>8</sup>Vgl. BUNDESREGIERUNG DEUTSCHLAND: (Perspektiven), S.1 ff.

<sup>9</sup>Vgl. PUFÉ, I.: (Nachhaltigkeit), S.55 ff.; VEREINTE NATIONEN: (Agenda 2030), S.1 ff.

## 3.2 Operationalisierung der Nachhaltigkeit

Die Nachhaltigkeit kann durch das Dreisäulenkonzept konkretisiert werden. Dieses entstand, wie bereits in Kapitel 3.1 angedeutet, aus der Notwendigkeit der nachhaltigen Entwicklung in den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts. Ökonomische, soziale und ökologische Ziele sollten fortan gemeinsam konsequent verfolgt werden.<sup>10</sup> Seitdem ist das Dreisäulenkonzept Ausgangspunkt zahlreicher nachhaltiger Konzepte.<sup>11</sup> Es kann auf unterschiedliche Weise dargestellt werden:

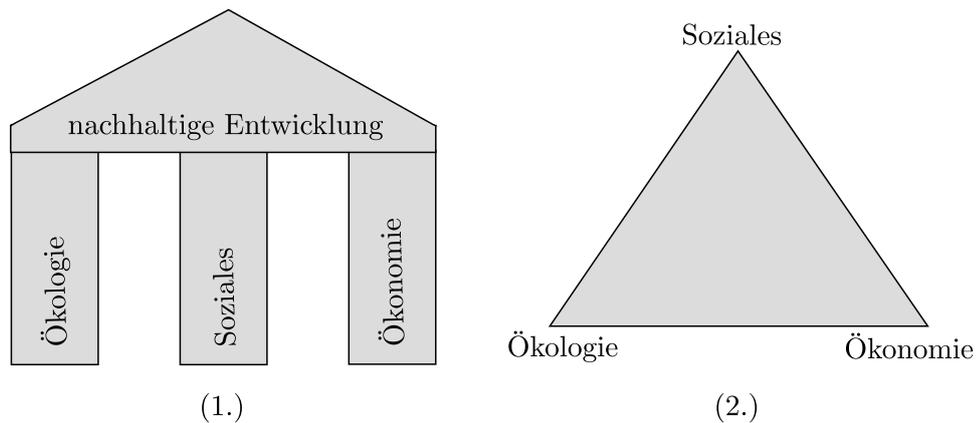


Abbildung 3.1: Visualisierung der Nachhaltigkeit, leicht modifiziert und in Anlehnung an KLEINE, S.74 f.

Das Dreisäulenkonzept kann durch das Dreisäulenmodell (1.) visualisiert werden. Es besteht jeweils aus einer ökologischen, ökonomischen und sozialen Dimension (Säule), die gemeinsam zur nachhaltigen Entwicklung (Dach) beitragen (vgl. Abbildung 3.1).<sup>12</sup> Die größte Schwachstelle dieses Modells liegt in den Austauschbeziehungen der Säulen. Die nachhaltige Entwicklung könnte statisch weiterhin bestehen, wenn eine der Säulen eliminiert würde. Da dies nicht dem Vorhaben der nachhaltigen Entwicklung entspricht, gilt dieses Modell als eher ungeeignet und überholt.<sup>13</sup> Diese Problematik führt dazu, dass die drei Dimensionen ebenfalls in einem Dreiecksmodell (2.) dargestellt werden können.<sup>14</sup> Das Nachhaltigkeitsdreieck besteht aus drei gleich langen Seiten, die die einzelnen Säulen (Soziales, Ökonomie und Ökologie) widerspiegeln. Dies bedeutet, dass jede Dimension gleichberechtigt und -bedeutend ist. In diesem Modell kann keine Dimension eliminiert werden. Das Nachhaltigkeitsdreieck dient als Grundlage zahlreicher Erweiterungen.<sup>15</sup> Eine davon wird als „Integrierendes Nachhaltigkeitsdreieck (IND)“ bezeichnet,

<sup>10</sup>Vgl. SACHVERSTÄNDIGENRAT FÜR UMWELTFRAGEN (SRU): (Umweltgutachten), Tz.2.

<sup>11</sup>Vgl. BARBIER, E. B.: (Development), S.87 f.; ARTS, B.: (Abgrenzung), S.17 ff.; DEUTSCHER BUNDESTAG: (Umgang), S.33 ff.

<sup>12</sup>Vgl. CORSTEN, H.; ROTH, S.: (Verantwortung), S.2; KLEINE, A.: (Operationalisierung), S.74.

<sup>13</sup>Vgl. KLEINE, A.: (Operationalisierung), S.75.

<sup>14</sup>Vgl. ebenda, S.74.

<sup>15</sup>Anmerkungen: Beispielhafte Einsatzmöglichkeiten des Nachhaltigkeitsdreiecks finden sich in KLEINE, A.: (Operationalisierung), S.77 ff.

das Interdependenzen der drei Dimensionen deutlich differenzierter darstellt:<sup>16</sup>

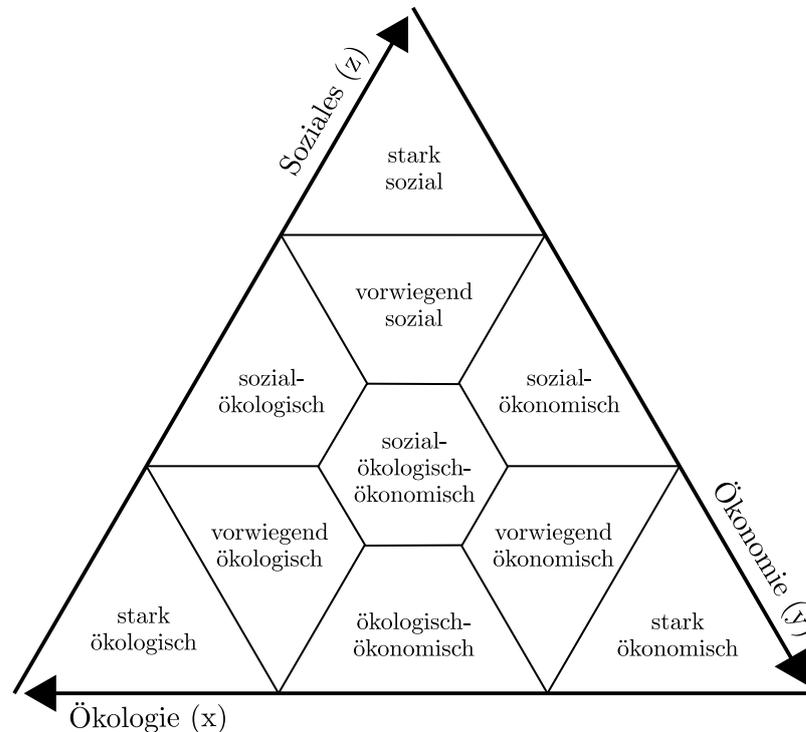


Abbildung 3.2: Integrierendes Nachhaltigkeitsdreieck, leicht modifiziert und in Anlehnung an KLEINE, S.84

Die Seiten des IND gleichen dem des Dreiecksmodells. Die dazugehörigen Pfeile geben die Richtung der jeweiligen steigenden Dimensionsintensität an. Durch die Unterteilung des IND ergeben sich 10 (Schnitt-)Mengen, die jeweils starke, mittlere oder schwache Ausprägungen der Dimensionen besitzen (vgl. Abbildung 3.3). In der Mitte des Modells befindet sich ein zentrales Feld, welches zu gleichen Teilen den Dimensionen entspricht. Es gilt: Umso weiter ein Feld von einer Ausgangsdimension entfernt ist, desto schwächer ist dessen Zuordnung zu dieser. Die Dimensionsstärke wird folgend anhand der ökologischen Dimension verdeutlicht (vgl. Abbildung 3.3). Im Falle einer starken Zuordnung (linkes IND) wird das Feld von einer einzigen, hier ökologischen, Dimension dominiert. Die restlichen zwei Dimensionen spielen eine untergeordnete Rolle. In der mittleren Zuordnung (mittleres IND) ist die ökologische Ausgangsdimension mit den weiteren sozialen und ökonomischen Bereichen vertreten. Der Einfluss der betrachteten Dimension ist gemischt groß und reicht von dominierend (vorwiegend ökologisch) über 50 Prozent (sozial-ökologisch und ökologisch-ökonomisch) bis hin zu 33,34 Prozent im zentralen Feld (sozial-ökologisch-ökonomisch). Die schwache Zuordnung (rechtes IND) repräsentiert die am weitesten entfernten Felder, die durch die übrigen Dimensionen, hier ökonomisch und sozial, dominiert werden.<sup>17</sup> Es wird darauf hingewiesen, dass in

<sup>16</sup>Vgl. KLEINE, A.: (Operationalisierung), S.84.

<sup>17</sup>Vgl. KLEINE, A.: (Operationalisierung), S.85.

vorliegender Arbeit vereinfacht keine Unterschiede hinsichtlich der Dimensionsstärke *innerhalb eines Feldes* berücksichtigt werden. Durch differenzierte Darstellungsmöglichkeiten der Dimensionen und deren Beziehungen zueinander eignet sich das IND sehr gut, um diese kontextabhängig zu operationalisieren.

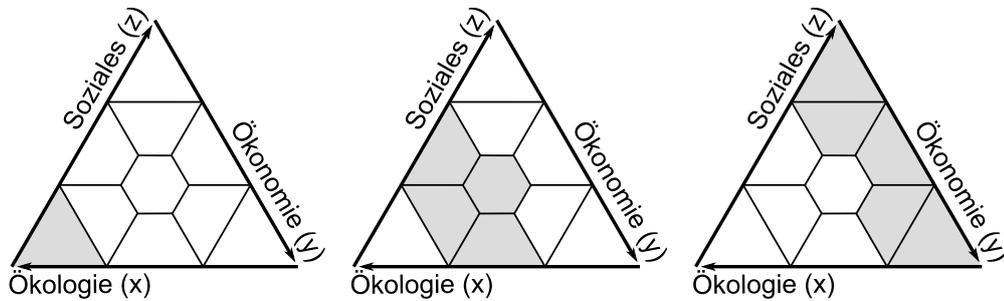


Abbildung 3.3: Zuordnungstärke anhand der ökologischen Dimension, leicht modifiziert und in Anlehnung an KLEINE, S.85

In der Literatur existieren Ansätze zur Erweiterung der Dimensionen.<sup>18</sup> Das soziale Segment kann bspw. durch ein kulturelles Subsystem untergliedert werden.<sup>19</sup> KLEINE führt an, dass Institutionen als Erweiterung und damit als vierte Dimensionen von Bedeutung sind.<sup>20</sup> Weiterhin existieren Überlegungen hinsichtlich der Integration technischer Aspekte, da diese durch die Entwicklung neuartiger Technologien an Präsenz gewinnen.<sup>21</sup> Diese können einerseits als eigenständige vierte Dimension in das Konzept integriert werden. Andererseits besteht die Möglichkeit, technische Fähigkeiten als Subsystem der existenten drei Dimensionen aufzufassen. Diese Arbeit basiert darauf, dass Technik als Mittel zur Zielverfolgung der anderen Dimensionen dient und damit keinen Selbstzweck darstellt.<sup>22</sup>

### 3.3 Nachhaltigkeit in Unternehmen

#### 3.3.1 Treiber und Zielstellungen der nachhaltigen Dimensionen

Die Motivation für Unternehmen sich der Thematik der Nachhaltigkeit anzunehmen, lässt sich auf zwei verschiedene Treiberarten zurückführen. Gemeint sind:<sup>23</sup>

1. Push- und
2. Pull-Faktoren.

<sup>18</sup>Vgl. COLSMAN, B.: (Nachhaltigkeitscontrolling), S.9; MIKUS, B.; GÖTZE, U.; SCHILDT, M.: (Koope-  
ration), S.29; KLEINE, A.: (Operationalisierung), S.13 f.

<sup>19</sup>Vgl. COLSMAN, B.: (Nachhaltigkeitscontrolling), S.9.

<sup>20</sup>Vgl. KLEINE, A.: (Operationalisierung), S.13 f.

<sup>21</sup>Anmerkung: Aufgrund der Zielsetzung dieser Arbeit werden die genannten Ansätze als begleitende Rollen betrachtet, jedoch nicht direkt erörtert.

<sup>22</sup>MIKUS, B.; GÖTZE, U.; SCHILDT, M.: (Koope-  
ration), S.29.

<sup>23</sup>PUFÉ, I.: (Nachhaltigkeit), S.26.

Die zwei Unterscheidungen werden von Megatrends<sup>24</sup> beeinflusst, welche langfristig und interdisziplinär auf Unternehmen einwirken.<sup>25</sup> Unter Push-Faktoren (1.) werden nachhaltige Gründe verstanden, die Unternehmen zum Umdenken anregen sämtliche betriebliche und (noch) nicht-nachhaltige Aktivitäten und Prozesse zu eliminieren oder zu verändern.<sup>26</sup> Push-Faktoren beeinflussen ebenfalls u.a. ökologische, soziale und ökonomische Bereiche des Unternehmens. Allerdings bestehen Wechselwirkungen zwischen diesen Segmenten, sodass eine eindeutige Abgrenzung z.T. nicht möglich ist. Bedingt durch den zu hohen Verbrauch an nicht erneuerbaren Rohstoffen kommt es immer häufiger zu Rohstoffengpässen und -erschöpfung.<sup>27</sup> Dadurch kann es zu Einschränkungen in betrieblichen Produktionsprozessen kommen. Zu den Push-Faktoren zählt außerdem die Optimierung von produktionsnahen Abläufen hinsichtlich der Reduzierung von Emissionen, Abfall und des Ressourcenverbrauchs.<sup>28</sup> Weiterhin gelten unzureichende Arbeitssicherheit, ungerechte Lohn- und Gehaltsverteilung sowie die Diskriminierung am Arbeitsplatz als betriebliche Herausforderungen. Hinzu kommt der demografische Wandel und damit einhergehend eine Verschiebung der Altersstrukturen der Mitarbeiter im Unternehmen. Es wird erwartet, dass die Belegschaft zunehmend älter und die Herausforderung, jüngeres und geeignetes Personal einzustellen, schwieriger wird.<sup>29</sup> Parallel dazu existieren Pull-Faktoren (2.), die Anreize zum nachhaltigen Wirtschaften und Verhalten inkludieren.<sup>30</sup> Konkrete Nutzenpotenziale für Unternehmen sind Differenzierungen gegenüber Marktkonkurrenten, ermöglicht bspw. durch (technische) Innovationen und den daraus resultierenden möglichen Wettbewerbsvorteilen. Ebenfalls erstrebenswert ist, dass der sorgfältige Umgang mit Rohstoffen zu einem geringeren Verbrauch und damit zum Schutz der Umwelt führt. Gleichzeitig gehen Kosteneinsparungen sowie eine Steigerung der Material- und Energieeffizienz einher.<sup>31</sup> Neue Technologien und Geschäftsmodelle bieten das Potenzial diese notwendigen Maßnahmen umzusetzen.<sup>32</sup> Aus diesem Grund hält die Thematik Nachhaltigkeit im Bereich der Unternehmenssteuerung, insb. im Controlling, vermehrt Einzug.<sup>33</sup> Vor allem ökologische und soziale Ziele werden in dem sonst stark ökonomisch geprägten Unternehmensbereich zunehmend berücksichtigt.<sup>34</sup>

---

<sup>24</sup>Anmerkung: Megatrends sind sehr langfristige (ca. 50 Jahre) Treiber, die auf zahlreiche interdisziplinäre Bereiche, wie bspw. Technologien, Unternehmen und deren Wertschöpfungsketten sowie Wertsysteme, einwirken, vgl. PUFÉ, I.: (Nachhaltigkeit), S.70.

<sup>25</sup>Vgl. PUFÉ, I.: (Nachhaltigkeit), S.26 ff.; MIKUS, B.; GÖTZE, U.; SCHILDT, M.: (Kooperation), S.25 f.; ABELE, E.; REINHART, G.: (Zukunft), S.11; ROGALL, H.: (Nachhaltige Ökonomie), S.123 f.

<sup>26</sup>PUFÉ, I.: (Nachhaltigkeit), S.26.

<sup>27</sup>SAILER, U.: (Nachhaltigkeitscontrolling), S.24 f.; PUFÉ, I.: (Nachhaltigkeit), S.26 f.; ABELE, E.; REINHART, G.: (Zukunft), S.17.

<sup>28</sup>PUFÉ, I.: (Nachhaltigkeit), S.119.

<sup>29</sup>MIKUS, B.; GÖTZE, U.; SCHILDT, M.: (Kooperation), S.26; ABELE, E.; REINHART, G.: (Zukunft), S.19.

<sup>30</sup>Vgl. PUFÉ, I.: (Nachhaltigkeit), S.30.

<sup>31</sup>Vgl. ebenda; FIGGE, F.; HAHN, T.: (Sustainable Value), S.8.

<sup>32</sup>Vgl. PUFÉ, I.: (Nachhaltigkeit), S.71; ABELE, E.; REINHART, G.: (Zukunft), S.10.

<sup>33</sup>Vgl. HORVÁTH, P.; GLEICH, R.; SEITER, M.: (Controlling), S.27; SAILER, U.: (Nachhaltigkeitscontrolling), S.17 ff.; MÜLLER, G.: (Lieferkettenmanagement), S.69 ff.

<sup>34</sup>Vgl. HORVÁTH, P.; GLEICH, R.; SEITER, M.: (Controlling), S.27.

Um unter Beachtung der genannten Treiber nachhaltig zu wirtschaften, bedarf es strukturierten Zielstellungen, die es den Bereichen der Wirtschaftswissenschaften umzusetzen gilt. Dazu zählen die Segmente der:

1. Volkswirtschaftslehre (VWL) und
2. Betriebswirtschaftslehre (BWL).<sup>35</sup>

Die VWL (1.) beschäftigt sich mit der gesamtwirtschaftlichen Situation und deren Zusammenhängen.<sup>36</sup> Die Thematik der Nachhaltigkeit wurde zunächst jahrelang ausschließlich im Bereich der VWL erforscht.<sup>37</sup> Die Agenda 2030 (vgl. Kapitel 3.1) beinhaltet fünf Prinzipien („5 Ps“), in denen zukünftige Ziele reglementiert werden.<sup>38</sup> Diese umfassen die Bereiche People (Menschen), Planet (Planet), Prosperity (Wohlstand), Peace (Frieden) und Partnership (Partnerschaft). Die 5 Ps bilden zusammen mit den 17 Sustainable Development Goals (SDG), den nachhaltigen Entwicklungszielen, das Leitbild der beteiligten Länder.<sup>39</sup> Für die vorliegende Arbeit wird der Bereich der VWL im Zusammenhang mit der Nachhaltigkeit bewusst ausgeschlossen, da das Forschungsobjekt CPS (vgl. Kapitel 2.1) im engeren Sinn ein Element des betrieblichen Umfelds darstellt.<sup>40</sup>

Der Schwerpunkt liegt fortlaufend auf dem wirtschaftswissenschaftlichen Segment der BWL (2.). Diese befasst sich mit einzelwirtschaftlichen Prozessen, Strukturen und Zusammenhängen in und zwischen Unternehmen und Haushalten.<sup>41</sup> Die nachhaltige Entwicklung sieht für jede einzelne Dimension Richtlinien, d.h. Zielstellungen, vor. Die *ökologische Dimension* besitzt die am intensivsten entwickelten Bestimmungen. Die Basis der Regeln bildet der Grundsatz des „kritischen ökologischen Kapitals“<sup>42</sup>, wonach Ökosysteme nur bis zu diesem Kapital Einflüsse vertragen können.<sup>43</sup> Die drei bedeutendsten Prinzipien der ökologischen Dimension sind:<sup>44</sup>

- Regenerationprinzip: Abbau- darf Anbauraten natürlicher Ressourcen nicht überschreiten.
- Assimilationsprinzip: Stoffzufluss in Umweltsystem darf nur so hoch sein wie die Umwelt assimilieren kann.
- Substitutionsprinzip: Erschöpfbare Ressourcen sollen bei unabdingbaren Ver- und Gebrauch durch Substitute ersetzt werden.

---

<sup>35</sup>Vgl. PUFÉ, I.: (Nachhaltigkeit), S.70.

<sup>36</sup>Vgl. BONTRUP, H.-J.: (Grundlagen), S.3.

<sup>37</sup>Vgl. ROGALL, H.: (Nachhaltige Ökonomie), S.123.

<sup>38</sup>Vgl. PUFÉ, I.: (Nachhaltigkeit), S.56.

<sup>39</sup>Vgl. ebenda, S.56 f.; VEREINTE NATIONEN: (Agenda 2030), S.1 ff.

<sup>40</sup>Anmerkung: Für weitere Informationen zu VWL und Nachhaltigkeit sei auf folgende Literatur verwiesen: BARDT, H.: (Indikatoren), S.11.

<sup>41</sup>Vgl. BONTRUP, H.-J.: (Grundlagen), S.3.

<sup>42</sup>Vgl. PEARCE, D. W.; ATKINSON, G. D.; DUBOURG, W. R.: (Sustainable Development), S.468.

<sup>43</sup>[Vgl. ebenda, S.468 ff.

<sup>44</sup>Vgl. CARLOWITZ, H.-C. v.: (Oeconomica), S.105 f.; CORSTEN, H.; ROTH, S.: (Verantwortung), S.3 f.

Ergänzungen der ökologischen Reglementierungen können durch die Reaktions-, Risiko- und die globale Verteilungsregel vorgenommen werden.<sup>45</sup> Die ökologischen Richtlinien können zur Unternehmenszielerreichung, d.h. der Sicherung langfristiger Existenz, auf drei unterschiedliche Arten beitragen (vgl. Abbildung 3.4).<sup>46</sup> Die Ökologie kann als Nebenbedingung (1.) der Unternehmung interpretiert werden. Diese Implementierung wird auch als Defensivstrategie bezeichnet, da sie nur die Mindestanforderungen der Behörden und Öffentlichkeit umsetzt. Ebenfalls kann sie als Chance (2.) im Unternehmen aufgefasst werden. Bei dieser Strategie wird auf Kostensenkung und Erlösvorteile abgezielt, die sich durch die Umsetzung geeigneter ökologischer Maßnahmen ergeben. Verfolgen Unternehmen eine Offensivstrategie, etablieren sie die Ökologie als alleinstehende Zielgröße in ihre Strategie.

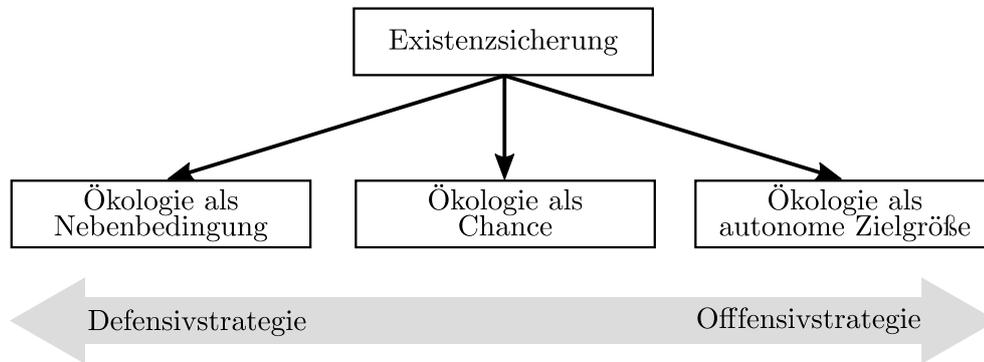


Abbildung 3.4: Unterscheidung der Unternehmensstrategie, modifiziert und in Anlehnung an STEGER, S.190 ff.

Die *ökonomische Dimension* ist allgemein für die effiziente Deckung gesellschaftlicher Bedarfe zuständig.<sup>47</sup> Dazu existieren folgende Rahmenbedingungen:<sup>48</sup>

- Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit durch soziale und technische Innovationen
- Erweiterung des Preissystems durch Integration ökologischer und sozialer Aspekte
- Aufbau und Erhalt der Leistungsfähigkeit durch ökonomisches Kapital (vgl. Kapitel 3.3.2)
- Stärkerer Einbezug qualitativer Größen

Am wenigstens detailliert definiert hinsichtlich ihrer konkreten Ziele ist die *soziale Dimension* für die folgende Vorgaben gelten:<sup>49</sup>

- Gewährleistung der Grundbedürfnisse (u.a. Bildung und Erwerbstätigkeit)
- Gerechtigkeit und Chancengleichheit hinsichtlich verschiedener Aspekte (u.a. Geschlecht, Minderheiten und Alter)

<sup>45</sup>Vgl. KLEINE, A.: (Operationalisierung), S.15 ff.

<sup>46</sup>Vgl. STEGER, U.: (Instrumente), S.190 ff.

<sup>47</sup>Vgl. KLEINE, A.: (Operationalisierung), S.17.

<sup>48</sup>Vgl. DEUTSCHER BUNDESTAG: (Leitbild), S.46 ff.; CORSTEN, H.; ROTH, S.: (Verantwortung), S.3 f.

<sup>49</sup>Vgl. DEUTSCHER BUNDESTAG: (Leitbild), S.49 ff.; EMPACHER, C.; WEHLING, P.: (Indikatoren), S.38 ff.; KLEINE, A.: (Operationalisierung), S.18 f.; CORSTEN, H.; ROTH, S.: (Verantwortung), S.5.

- Achtung des sozialen Kapitals als Nutzenpotenziale und -chancen

Sämtliche soziale Ziele repräsentieren gemeinsam den Fortbestand zukünftiger Generationen. Abschließend ist zu sagen, dass Unternehmen vor interdisziplinären Herausforderungen stehen, die Vielzahl an Treibern, nachhaltigen Richtlinien und die strategische Ausrichtung des Unternehmens in Einklang zu bringen. Allerdings herrscht Einigkeit darüber, dass Unternehmen ihre Existenz langfristig nur sichern können, indem sie die drei Dimensionen wirksam aufeinander abstimmen.<sup>50</sup> Dazu wird eine Unternehmenskultur benötigt, in der ressourcenbewusstes Handeln etabliert wird. Des Weiteren sind effiziente Maschinenanlagen nötig, um nachhaltige Produkte zu fertigen. Neue Technologien, die wertschöpfungsübergreifend, selbsthandelnd und intelligent handeln, könnten eine Möglichkeit darstellen, diese Herausforderungen zu bewältigen.<sup>51</sup>

### 3.3.2 Kapital der nachhaltigen Dimensionen

Im Kontext des Dreisäulenkonzepts können die drei Dimensionen als existenzielle Unternehmenssubstanz und damit als Kapitalarten verstanden werden. Unterschieden werden folglich:<sup>52</sup>

1. ökologisches,
2. ökonomisches und
3. soziales Kapital.

Das ökologische Kapital (1.) umfasst die Gesamtheit natürlicher erneuerbarer Ressourcen, die Beanspruchung von Land und verschiedene ökologische Kreisläufe.<sup>53</sup> Das ökonomische Kapital (2.) hingegen besteht aus materiellen und immateriellen sowie Humanressourcen und Fähigkeiten bzw. Kompetenzen des Unternehmens. Abbildung 3.5 zeigt eine mögliche Einteilung ökonomischen Kapitals.<sup>54</sup> Das Sozialkapital (3.) beinhaltet v.a. gesellschaftliche Wahrnehmungen, die vorrangig subjektiver Natur sind. Sie kennzeichnet u.a. die Grundbedürfnisse, die (betriebliche) Integration und Weiterentwicklung einer Person oder Personengruppe. Anzumerken ist weiterhin, dass eine eindeutige Zuordnung einer Ressource zu einer Kapitalart nicht immer eindeutig vorgenommen werden kann. Stellvertretend dafür steht das Humankapital, welches einerseits aufgrund seines ökonomischen Einsatzes dem wirtschaftlichen Kapital zugeordnet werden kann. Andererseits beinhaltet es den Faktor Mensch und kann somit ebenfalls dem sozialen Kapital zugeordnet werden.<sup>55</sup> Zusammengefasst kann gesagt werden, dass nachhaltiges Kapital nicht ausschließlich in monetären Einheiten gemessen werden soll, sondern darüber hinaus ebenfalls zeitliche, physikalische und qualitative Eigenschaften aufweist.<sup>56</sup>

<sup>50</sup>Vgl. WALL, F.; SCHRÖDER, R. W.: (Shareholder Value), S.262.

<sup>51</sup>Vgl. ABELE, E.; REINHART, G.: (Zukunft), S.168.

<sup>52</sup>Vgl. KLEINE, A.: (Operationalisierung), S.10.

<sup>53</sup>Vgl. ebenda, S.10.

<sup>54</sup>Vgl. KÜHN, R.; GRÜNIG, R.: (Beurteilung), S.144.

<sup>55</sup>Vgl. KLEINE, A.: (Operationalisierung), S.12.

<sup>56</sup>Vgl. CORSTEN, H.; ROTH, S.: (Verantwortung), S.7.

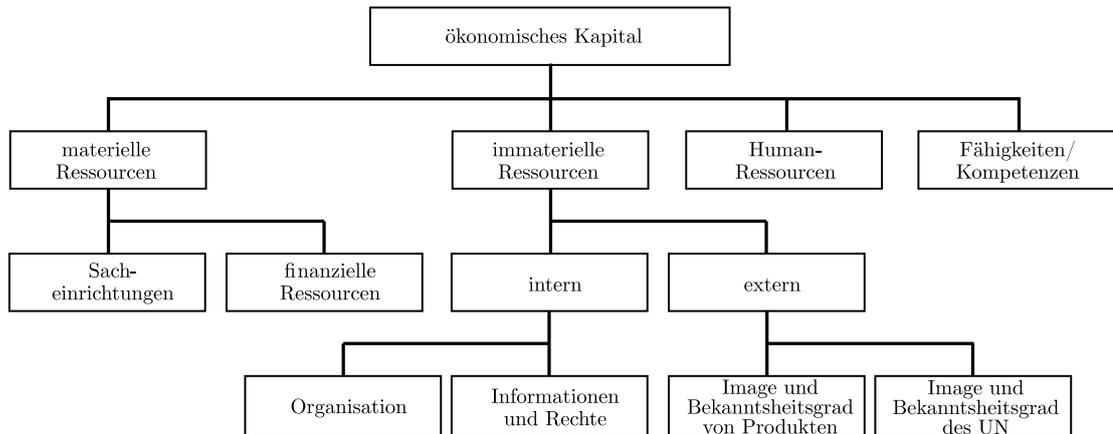


Abbildung 3.5: Einteilung des ökonomischen Kapitals, modifiziert und in Anlehnung an KÜHN; GRÜNIG, S.144

Bezugnehmend auf Kapitel 2 kann festgehalten werden, dass CPS in ihrer Ausprägung und ihrer Anwendung sämtliche Dimensionen der Nachhaltigkeit tangieren. Daraus resultiert, dass diese soziotechnischen Systeme ebenfalls verschiedene Ebenen des betrieblichen Kapitals betreffen. Die sich ergebenden, verschiedenen Herausforderungen und Chancen der CPS sollten daher betriebswirtschaftlich analysiert und bewertet werden. Kapitel 3.4 gibt zunächst einen Überblick über gängige Bewertungsinstrumente unter Einbezug nachhaltiger Aspekte.

## 3.4 Bewertungsinstrumente unter Einbezug der Nachhaltigkeit

### 3.4.1 Einordnung und Begriffsklärung der Bewertung

Für nachhaltige Bewertungen bieten sich ausgewählte Instrumente des Controllings an.<sup>57</sup> Letzteres zielt in dieser Arbeit auf ein Einwirken des Ablaufs und der Gestalt des gesamten Führungssystems ab. Es ist für die (systembildende und systemkoppelnde) Koordination von Kontrolle, Informationsversorgung und Planung zuständig.<sup>58</sup> Es entspricht damit Typ IV der Controllingkonzeptionen nach ZENZ. Die Planung ist als Subsystem für die Lösung von Koordinationskonflikten<sup>59</sup> und für den Fortbestand des gesamten Unternehmens, für die Reduzierung der Komplexität und Erhöhung der Flexibilität im Unternehmen von großer Bedeutung.<sup>60</sup> Der Planung liegt ein Prozess zu Grunde, der in einzelne Phasen gegliedert ist (vgl. Abbildung 3.6).<sup>61</sup> Die Bewertung reiht sich zwischen Alternativensuche und Entscheidung in den Ablauf ein. Auffallend

<sup>57</sup>Vgl. GÖTZE, U.; LINDNER, R. u. a.: (eniPROD), S.7.

<sup>58</sup>Vgl. HORVÁTH, P.; GLEICH, R.; SEITER, M.: (Controlling), S.58; ZENZ, A.: (Qualitätscontrolling), S.16 ff.

<sup>59</sup>Anmerkung: Diese entstehen aufgrund von komplexen Unternehmensentscheidungen, die alle drei Dimensionen umfassen, vgl. HORVÁTH, P.; GLEICH, R.; SEITER, M.: (Controlling), S.44.

<sup>60</sup>Vgl. HORVÁTH, P.; GLEICH, R.; SEITER, M.: (Controlling), S.68.

<sup>61</sup>Vgl. ebenda, S.93; GRAUMANN, M.: (Schnittstellen), S.5; WILD, J.: (Unternehmensplanung), S.32 ff.

ist, dass der Begriff der Bewertung in der Literatur nur unzulänglich und selten definiert wird. Eine Annäherung an die Bezeichnung liefert HEINRICH, indem die Bewertung als „zielbezogene Beurteilung“<sup>62</sup> von Bewertungsobjekten definiert und mit einer Evaluation gleichgesetzt wird.<sup>63</sup>

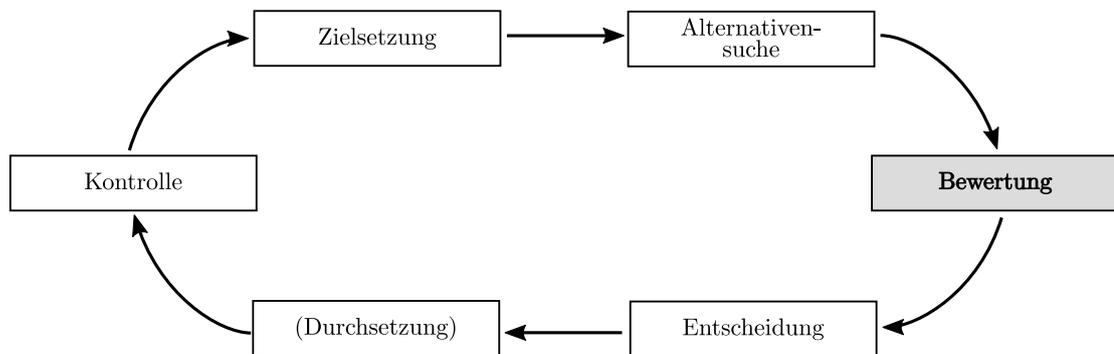


Abbildung 3.6: Die Planungsabfolge, leicht modifiziert und in Anlehnung an GRAU-MANN, S.5

Für die vorliegende Arbeit gilt, dass unter einer Bewertung

- die Analyse des Ist-Zustandes eines Bewertungsobjektes und seine Entwicklungsmöglichkeiten,
- die Abschätzung der Folgen des Bewertungsobjektes,
- die Beurteilung anhand von Bewertungszielen und
- die Ableitung und Ausarbeitung von Gestaltungs- und Handlungsmöglichkeiten verstanden wird.<sup>64</sup>

Es ist kontextabhängig, was unter einem Bewertungsobjekt verstanden wird. Das Ziel einer Bewertung ist folglich die Durchführung einer Überprüfung zur Eignung des Untersuchungsobjektes. Anschließend können diese Erkenntnisse als Entscheidungsvorbereitung genutzt werden.<sup>65</sup>

### 3.4.2 Vorstellung ausgewählter Controllinginstrumente

Betriebliche Maßnahmen, die aufgrund von Treibkräften und Zielstellungen (vgl. Kapitel 3.3.1) notwendig sind, sollten vor und nach ihrem Inkrafttreten unter Einbezug der Nachhaltigkeit bewertet werden, um ihre Wirkungen abzuschätzen und entsprechend zügig darauf reagieren zu können. Dazu stehen verschiedene Instrumente des Controllings zur Verfügung. Bezüglich der vermehrt aufkommenden Anstrengungen der Unternehmen nachhaltig zu wirtschaften, ist es erstens von großem Interesse abzuschätzen, inwiefern

<sup>62</sup>HEINRICH, L. J.: (Planung), S.57.

<sup>63</sup>Vgl. ebenda, S.57.

<sup>64</sup>Vgl. STEGER, U.: (Umweltmanagement), S.276.

<sup>65</sup>Anmerkung: Die Entscheidung selbst gehört nicht zum Bewertungsprozess.

sich zukünftige nachhaltige Investitionen als vorteilhaft erweisen. Anschließend müssen diese, insofern sie realisiert wurden, und zuvor betrieblich bestehende Objekte auf ihre Nachhaltigkeit überprüft und bewertet werden. Aus diesen zwei Zielstellungen ergibt sich das Kriterium des Zeitbezuges mit zwei Ausprägungen.<sup>66</sup> Das erste Attribut davon trägt die Eigenschaft zukunftsorientiert. Darunter werden sämtliche Instrumente gegliedert, die dazu dienen, die Vorteilhaftigkeit von zukünftigen Maßnahmen zu beurteilen. Das zweite Merkmal ist vergangenheitsorientiert ausgeprägt und umschließt all die Instrumente, die zur Bewertung bestehender Untersuchungsobjekte dienen. Hinsichtlich der Instrumente wurde eine Auswahl getroffen. Einerseits wurden klassische und zahlreich in der Literatur zitierte Controllinginstrumente und deren Erweiterungen aufgegriffen. Andererseits wurden unternehmensstrategische und lebenszyklusbezogene Instrumente ausgewählt, die sich zur Bewertung unter Einbezug der nachhaltigen Dimensionen eignen.

Zu den klassischen Instrumenten des Controllings zählen v.a. Konzepte der Kostenrechnung und des Kostenmanagements sowie des Investitionsmanagements. Die Kostenrechnung beschäftigt sich mit der Bewertung des verursachten Wertverzehr innerbetrieblicher Leistungserstellungen.<sup>67</sup> Infolge des Verursachungsprinzips<sup>68</sup> gilt die Kostenrechnung und ihre Instrumente als vergangenheitsorientiert. Eine Methode davon ist die *Prozesskostenrechnung*, die v.a. die Gemeinkosten möglichst verursachungsgerecht zu verteilen versucht, indem sie interne Prozesse aufschlüsselt.<sup>69</sup> Des Weiteren existieren die *Materialfluss-*, *Ressourcen-* und *Umweltkostenrechnung*. Erstere bildet Energie- und Materialflüsse ab, welche monetäre Einheiten (v.a. Kosten) und physikalische Maßgrößen (bspw. Gewichte) zur Bewertung nutzt.<sup>70</sup> Ziel ist, die Energie- und Materialeffizienz zu optimieren und ebenfalls Ineffizienzen aufzudecken, indem Kosten einerseits dem Produkt und andererseits dem restlichen Output („Non-Produkt-Output“<sup>71</sup>) zugeordnet werden.<sup>72</sup> Die *Ressourcenkostenrechnung* ähnelt stark dem zuvor beschriebenen Instrument. Jedoch wird kein gesamtes Energie- und Materialstrommodell erstellt. Die Verteilung von Kosten geschieht durch ungenauere und nicht exakte Verlustkoeffizienten.<sup>73</sup> Die *Umweltkostenrechnung* betrachtet den Wertverzehr umweltbezogener Aktivitäten. Dazu gehören u.a. Kosten zur Verminderung und Vermeidung von Umweltwirkungen

---

<sup>66</sup>Anmerkung: Neben der Zeitorientierung können Controllinginstrumente ebenfalls nach anderen Merkmalen unterschieden werden. Eine Klassifizierungsversuch ist im Anhang in Abbildung A.1 einzusehen.

<sup>67</sup>Vgl. GÖTZE, U.: (Kostenrechnung), S.1.

<sup>68</sup>Anmerkung: Unter Verursachungsprinzip wird der Grundsatz verstanden, dass nur die in der Vergangenheit angefallene Kosten einem Betrachtungsobjekt zugeordnet werden, die es tatsächlich verursachte, vgl. GÖTZE, U.: (Kostenrechnung), S.39.

<sup>69</sup>Vgl. GÖTZE, U.: (Kostenrechnung), S.217 ff.; COLSMAN, B.: (Nachhaltigkeitscontrolling), S.76 ff.

<sup>70</sup>Anmerkung: Die Materialflusskostenrechnung besitzt nicht exakt den gleichen Aufbau der klassischen Kostenrechnung, wird aber aufgrund ihrer Ähnlichkeit der einzelnen Bereiche zur Kostenrechnung zugeordnet, vgl. SCHRACK, D.: (Materialflusskostenrechnung), S.158.

<sup>71</sup>SCHRACK, D.: (Materialflusskostenrechnung), S.159.

<sup>72</sup>Vgl. ebenda, S.157 ff.; GÜNTHER, E.; PROX, M.: (ISO Norm), S.39 ff.

<sup>73</sup>Vgl. SCHRACK, D.: (Materialflusskostenrechnung), S.170 ff.

und Kosten zur Beseitigung von Umweltschäden.<sup>74</sup> Die Ergebnisse können für die Beurteilung des Umweltschutzes, die Definition von UN-Strategien und für Potenziale zur Verbesserung interner Prozesse und Produkte genutzt werden.<sup>75</sup> Das Kostenmanagement beschäftigt sich vorrangig mit der Kostenbeeinflussung zu Beginn des Lebenszyklus von Ressourcen, Produkten und Prozessen und wird daher weiter gefasst als die Kostenrechnung.<sup>76</sup> Als Instrument ist das *Target Costing (TC)* zu erwähnen, welches markt- und zukunftsorientiert Zielkosten für Produkte, deren Funktionen und Komponenten festlegt. Folglich wird bestimmt, wie viel ein Produkt zukünftig am Markt kosten darf.<sup>77</sup> Das *Benchmarking* gliedert sich ebenfalls in das Kostenmanagement ein und besteht aus einem Vergleich von bspw. Prozessen, Produkten oder Strategien zwischen Unternehmen und/oder deren Bereichen. Dazu bezieht sich das Instrument auf bereits verursachte Kosten-, Qualitäts-, Zeit- und Kundenzufriedenheitsmaßgrößen. Demzufolge ist das Benchmarking eine vergangenheitsorientierte Methode.<sup>78</sup>

Im Folgenden wird der zweite klassische Bereich, das Investitionsmanagement, vorgestellt. Sämtliche Instrumente dieses Bereichs gelten als zukunftsorientiert, da sie mögliche zukünftige Investitionen auf ihre Vorteilhaftigkeit überprüfen. Das Investitionsmanagement wird u.a. in Verfahren zur Vorteilhaftigkeitsentscheidungen mit einer und mehreren Zielgrößen untergliedert.<sup>79</sup> Die Entscheidungsinstrumente mit einer Zielgröße werden weiterhin in statische (eine Periode) und dynamische (n Perioden) Verfahren separiert. Zu den statischen Methoden gehören die *Kostenvergleichs-*, *Gewinnvergleichs-*, *Rentabilitäts-* und *Amortisationsrechnung*.<sup>80</sup> Sie unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Zielgröße: Kosten, Gewinn, Rentabilität und Amortisationszeit.<sup>81</sup> Obwohl statische Investitionsrechnung auf zukünftige Maßnahmen abzielen, verwenden diese die Zahlungsgrößen Kosten bzw. Erlöse, welche den Güterverzehr bzw. das Ergebnis verursachungsgerecht - parallel zur Kostenrechnung - bewerten. Zu den dynamische Modellen gehören u.a. die *Kapitalwert (KW)-Methode*, *die Annuitätenmethode*, *die Methode des Internen Zinsfußes* und die *dynamische Amortisationsrechnung*.<sup>82</sup> Diese Verfahren verwenden die Rechengrößen Ein- und Auszahlungen. Werden mehrere Zielgrößen, bspw. ökologische, soziale und teilweise ökonomische Aspekte, einbezogen, kann die *Nutzwertanalyse* angewandt werden. Diese ermittelt in mehreren Schritten einen Nutzwert für jede mögliche Investitionsalternative.

Weiterhin existieren Instrumente, die eine (nachhaltige) Unternehmensstrategie umzu-

---

<sup>74</sup>Vgl. GÖTZE, U.: (Kostenrechnung), S.248; LETMATHE, P.; WAGNER, G. R.: (Umweltkostenrechnung), S.1.

<sup>75</sup>Vgl. ebenda.

<sup>76</sup>Vgl. GÖTZE, U.: (Kostenrechnung), S.273 ff.

<sup>77</sup>Vgl. ebenda, S.283 ff.; SCHRACK, D.: (Materialflusskostenrechnung), S.257 f.

<sup>78</sup>Vgl. GÖTZE, U.: (Kostenrechnung), S.323 ff.; DEUTSCH, N.; KRUGER, L.; MICHEL, T.: (Benchmarking), S.141 ff.; MÜLLER, G.: (Lieferkettenmanagement), S.156 ff.

<sup>79</sup>Anmerkung: Für weitere Unterscheidungskriterien sei auf GÖTZE, U.: (Investitionsrechnung), S.45 f. verwiesen.

<sup>80</sup>Vgl. GÖTZE, U.: (Investitionsrechnung), S.56 ff.

<sup>81</sup>Vgl. ebenda, S.57.

<sup>82</sup>Vgl. GÖTZE, U.: (Investitionsrechnung), S.77.

setzen versuchen. Die *Sustainability Balanced Scorecard (SBSC)* dient zur Aufschlüsselung der Vision des Unternehmens. In diese werden aussagekräftige Kennzahlen integriert und in vier verschiedenen Perspektiven dargestellt. Dieses Instrument ist eine Erweiterung der klassischen *Balanced Scorecard*.<sup>83</sup> Der *Sustainable Value* ist eine wertorientierte Spitzenkennzahl, die sich aus ökologischer, sozialer und ökonomischer Performance eines Unternehmens ermittelt. Das Instrument ist vergangenheitsorientiert, da es den zurückliegenden mit dem gegenwärtigen Verbrauch ausgewählter Ressourcen vergleicht.<sup>84</sup> Die *Wesentlichkeitsanalyse* ist ein Instrument zur Identifikation von Nachhaltigkeitsthemen. Dazu werden Umfeld- und Unternehmensanalysen, bspw. in einer SWOT-Analyse<sup>85</sup>, und Dialoge mit Interessengruppen durchgeführt. Als Ergebnis werden wesentliche zukunftsbezogene Handlungsfelder für das Unternehmen abgeleitet.<sup>86</sup> *Nachhaltigkeitschecklisten* verfolgen das Ziel, eine Ist-Analyse anhand vergangener Werte des Unternehmens oder eines Unternehmensbereiches hinsichtlich des nachhaltigen Wirtschaftens durchzuführen.<sup>87</sup>

Der dritte Bereich ausgewählter Bewertungsinstrumente bezieht sich auf lebenszyklusbezogene Methoden. Als genormte ökologieorientierte Methode ist die Ökobilanz, auch als *Life Cycle Assessment (LCA)* bekannt, zu erwähnen.<sup>88</sup> In diesem Instrument werden Stoff- und Energieströme von Produkten über den ganzen Lebenszyklus hinweg identifiziert, um im Anschluss ökologische Optimierungspotenziale aufzudecken.<sup>89</sup> Parallel dazu existiert die *Social Life Cycle Assessment (SLCA)*, welche soziale Aspekte lebenszyklusübergreifend analysiert und bewertet.<sup>90</sup> Das *Life Cycle Costing (LCC)* untersucht Kosten (und Erlöse) oder Zahlungen eines Untersuchungsobjekts, bspw. Produkte, Technologien und Ressourcen entlang des Lebenszyklus.<sup>91</sup> Zur Bewertung der ausschließlich monetären Größen werden passende Lebenszyklusmodelle herangezogen. Je nach Zielobjekt lassen sich Lebenszyklusmodelle unterscheiden. Exemplarisch dafür stehen der klassische und integrierte Produktlebenszyklus sowie Modelle des Lebenszyklus für Technologien, Anlagen und Software.<sup>92</sup> LCA, SLCA und LCC ergeben zusammen das *Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA)*, welches eine ganzheitliche und integrierte lebenszyklusbezogene Analyse und Bewertung vornimmt.<sup>93</sup>

<sup>83</sup>Vgl. SAILER, U.: (Nachhaltigkeitscontrolling), S.209.

<sup>84</sup>Vgl. ebenda, S.211 ff.; FIGGE, F.; HAHN, T.: (Sustainable Value), S.126-141.

<sup>85</sup>Anmerkung: SWOT steht für die englischen Begriffe Strengths (Stärke), Weaknesses (Schwächen), Opportunities (Chancen) und Threats (Risiken), vgl. WELGE, M. K.; AL-LAHAM, A.; EULERICH, M.: (Implementierung), S.299.

<sup>86</sup>Vgl. HAHN, D.; TAYLOR, B.: (Unternehmensplanung), S.106 ff.

<sup>87</sup>Vgl. COLSMAN, B.: (Nachhaltigkeitscontrolling), S.58 f.

<sup>88</sup>Vgl. DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN): (DIN EN ISO 14040), S.1 ff.

<sup>89</sup>Vgl. SCHRACK, D.: (Materialflusskostenrechnung), S.134 ff.

<sup>90</sup>Vgl. HAUSCHILD, M. Z.; ROSENBAUM, R. K.; OLSEN, S.: (Life Cycle Assessment), S.401 ff.; MOLTESEN, A.; BONOU, A. u. a.: (Social Life Cycle Assessment), S.401 ff.

<sup>91</sup>Vgl. GÖTZE, U.: (Kostenrechnung), S.299 ff.

<sup>92</sup>Vgl. ebenda, S.300 ff.; MEYNERTS, L.: (Wirtschaftlichkeitsanalysen), S.1; MAHLENDORF, M.: (Umweltkostenrechnungssystemen), S.66.

<sup>93</sup>Vgl. HAUSCHILD, M. Z.; ROSENBAUM, R. K.; OLSEN, S.: (Life Cycle Assessment), S.521; KLOEPFFER, W.: (Sustainability), S.89 ff.;

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass eine Vielzahl an Bewertungsinstrumenten unter Einbezug der Nachhaltigkeit zur Verfügung steht. Je nach Betrachtungsobjekt und Bewertungsziel können diese ausgewählt und in zukunfts- und/oder vergangenheitsbezogenen Beurteilungen angewandt werden. Nachfolgende Abbildung 3.4.2 gibt eine zusammenfassende Übersicht über die ausgewählten Controllinginstrumente und deren Zeitbezug. Zutreffende Merkmale werden mit einem „×“ markiert, unzutreffende Attribute bleiben unausgefüllt.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass derzeit keine geeigneten und spezifischen Bewertungsinstrumente für CPS vorliegen. Aus diesem Grund wird in den folgenden Kapitel ein Vorgehensmodell entwickelt, welches bestehende Bewertungsinstrumente auf Eignung für CPS unter Einbezug der Nachhaltigkeit prüft.

	Zeitorientierung	
	Zukunft	Vergangenheit
Kostenrechnung und -management		
Kostenrechnung		
Prozesskostenrechnung		×
Materialflusskostenrechnung		×
Ressourcenkostenrechnung		×
Umweltkostenrechnung		×
Kostenmanagement		
TC	×	
Benchmarking		×
Investitionsmanagement		
Vorteilhaftigkeitsentscheidung mit einer Zielgröße		
Kostenvergleichsrechnung	×	
Gewinnvergleichsrechnung	×	
Rentabilitätsrechnung	×	
Amortisationsrechnung	×	
KW-Methode	×	
Annuitätenmethode	×	
Dynamische Amortisationsrechnung	×	
Methode des internen Zinsfußes	×	
Vorteilhaftigkeitsentscheidung mit mehreren Zielgrößen		
Nutzwertanalyse	×	
Instrumente der Unternehmensstrategie		
SBSC	×	×
Sustainable Value		×
Wesentlichkeitsanalyse	×	
Nachhaltigkeitschecklisten		×
Lebenszyklusbezogene Instrumente		
LCSA	×	
LCA	×	
SLCA	×	
LCC	×	

Tabelle 3.1: Ausgewählte Controllinginstrumente und deren Zeitbezug, eigene Tabelle

# 4 Untersuchung von Bewertungsansätzen für cyber-physische Systeme

## 4.1 Methodik der Untersuchung

Das folgende Kapitel enthält eine Kombination aus den Grundlagen von CPS (vgl. Kapitel 2) und der Thematik der Nachhaltigkeit (vgl. Kapitel 3). Folglich werden Bewertungsansätze auf ihre Eignung für CPS unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeit geprüft. Dem Aufbau einer Bewertung<sup>1</sup> und der Visualisierung eines ähnlichen Vorgehensmodells<sup>2</sup> folgend, wurde ein Ablauf zur Prüfung auf Eignung von Bewertungsinstrumenten für CPS unter Einbezug der Nachhaltigkeit entwickelt (vgl. Abbildung 4.1). Dieser kommt in den nachfolgenden Abschnitten (vgl. Kapitel 4.1 - 4.6) zur Anwendung.

Zunächst werden allgemeine Bewertungsanforderungen (1.) festgelegt. Sie dienen als Rahmenbedingungen für die folgende Überprüfung. Anschließend wird der Untersuchungsrahmen ermittelt (2.). Infolgedessen wird das Betrachtungsobjekt erläutert, die Systemgrenzen definiert und die Bewertungsziele beschrieben. So entsteht eine fixe Grundlage, die für sämtliche Bewertungsinstrumente gleichermaßen gilt. Um die vorher festgelegten Ziele zu erreichen, werden Kriterien für die ausgewählten Beurteilungsansätze im nächsten Schritt (3.) festgelegt und gewichtet. Diese werden aus den Spezifika der CPS (vgl. Kapitel 2) und der Nachhaltigkeit (vgl. Kapitel 3) entwickelt. Im Anschluss erfolgt die Untersuchung ausgewählter Instrumente anhand der zuvor festgelegten Kriterien (4.). Diese bildet den Schwerpunkt des Vorgehensmodells. Zunächst werden offensichtlich ungeeignete Instrumente für CPS aus den vorgestellten Controllinginstrumenten (vgl. Kapitel 3.4.2) eliminiert, spezielle Beurteilungsmethoden für CPS hinzugefügt und anschließend in einer Übersicht zusammengeführt. Dazu werden zuvor ausgewählten Bewertungsinstrumente in zukunfts- und vergangenheitsorientiert eingeteilt und nacheinander überprüft. Die explizite Untersuchung der Bewertungsansätze kann als Submodell des gesamten Vorgehensmodells (vgl. Abbildung 4.1) verstanden werden und ist wie folgt aufgebaut:

1. Vorstellung der Zielstellung und -größe(n)
2. Erklärung des Instrumentenvorgehens, ggf. unter Einbezug der Berechnungsmethodik
3. Überprüfung und Beurteilung des Instrumentes anhand der zuvor festgelegten Kriterien
4. Fazit des Instruments

Schlussendlich folgt eine Gesamtbeurteilung der Einsatzfähigkeit der untersuchten Bewertungsinstrumente für CPS (5.) in Kapitel 4.6.

---

<sup>1</sup>Vgl. HORVÁTH, P.; GLEICH, R.; SEITER, M.: (Controlling), S.93.

<sup>2</sup>Vgl. GÖTZE, U.; LINDNER, R. u. a.: (eniPROD), S.346.

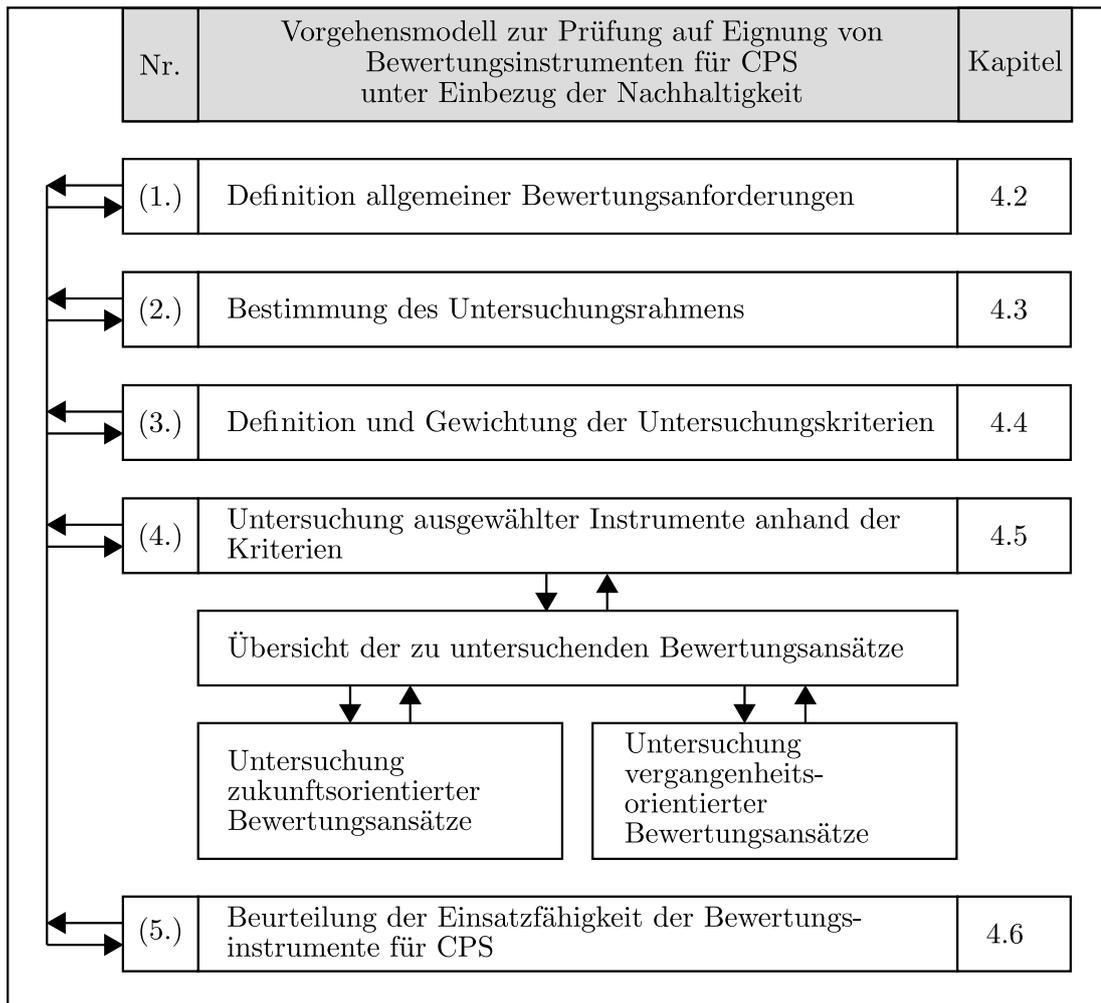


Abbildung 4.1: Vorgehensmodell zur Eignungsprüfung der Bewertungsinstrumente für CPS, eigene Darstellung

## 4.2 Definition allgemeiner Bewertungsanforderungen

Um eine Bewertung mit hoher Aussagekraft vornehmen zu können, bedarf es vorab der Festlegung allgemeiner Anforderungen an die Bewertung. Dazu gehören:<sup>3</sup>

1. Genauigkeit, Transparenz und Vollständigkeit,
2. eine präzise Definition und Abgrenzung des zu untersuchenden Objekts und/oder Systems und
3. die Auswahl und Erfassung der benötigten qualitativen und quantitativen Einflussgrößen.

Die drei Merkmale Genauigkeit, Transparenz und Vollständigkeit (1.) sind unabdingbar für den nachhaltigen Mehrwert der Bewertung. Erstere zielt darauf ab eine möglichst

<sup>3</sup>Vgl. GÖTZE, U.; LINDNER, R. u. a.: (eniPROD), S.3.

realitätsnahe Bewertung durchzuführen, die folgend zur Entscheidungsvorbereitung und damit zur Problemlösung genutzt werden kann. Die Transparenz ist nötig, um die Bewertungsdurchführung zum einen nachvollziehbar zu gestalten. Zum anderen erhöht sich damit die Akzeptanz der Beteiligten an der Bewertung und deren Ergebnisse. Von Vorteil ist es, wenn einzelne Bewertungsschritte und deren Annahmen akribisch dokumentiert werden. Die Vollständigkeit kann auf zwei unterschiedlichen Arten erreicht werden. Einerseits ist der sachliche Bezug gemeint. Dieser stellt die Frage nach der Vollständigkeit der ökonomischen, ökologischen und sozialen Einflussgrößen, der Prozesse und der Übertragung auf und Repräsentation für mehrere Objekte und Systeme. Andererseits sollte ein zeitlicher Bezug der Vollständigkeit bei der Bewertung hergestellt werden. Dieser sollte, wenn möglich, den vollständigen vorher definierten Zeitrahmen des zu untersuchenden Objekts oder Systems abdecken. Der zeitliche Bezug gilt als Herausforderung, da über einen lediglich kurzen Zeitraum ermittelte Einflussgrößen - wie es bei CPS der Fall ist - auf langfristige nachhaltige Instrumente übertragen werden.

Die präzise Definition (2.) des zu untersuchenden Objekts bzw. Systems ist nötig, um aussagekräftige Bewertungsinstrumente anwenden und damit zur Problembeurteilung und -lösung beitragen zu können. Die konkrete Festlegung führt gleichzeitig zu einer Determination der Untersuchungsgrenzen.

Die Auswahl und Erfassung der Einflussgrößen (3.) ist ebenfalls eine unabdingbare Anforderung, um den Mehrwert einer Bewertung zu steigern. Dabei soll erstens eindeutig geklärt und ausgewählt werden, welche Einflussgrößen für das jeweilige Bewertungsinstrument, bspw. in Hinsicht auf qualitative und quantitative Art, verwendet wird. Zweitens ist aufzuzeigen, wie diese Aspekte erfasst werden.<sup>4</sup> Sämtliche gelisteten Anforderungen bilden die Basis für den Einsatz aussagekräftiger Bewertungsinstrumente, die in den folgenden Kapiteln erörtert werden.

### 4.3 Bestimmung des Untersuchungsrahmens

Der Untersuchungsrahmen umfasst die Definition des Bewertungsobjekts, der Systemgrenzen und der Bewertungsziele. Beim *Bewertungsobjekt* handelt es sich um das in Kapitel 2 vorgestellte CPS, welches aus der physischen Einheit und dem eingebetteten System besteht. Die folgende Untersuchung findet für beide Aufbauarten, d.h. sowohl für Erweiterungen bestehender physischer Objekte als auch vollkommene CPS-Lösungen, statt. Des Weiteren ist zu erwähnen, dass CPS gem. Kapitel 3.3.2 dem ökonomischen Kapital angehört. Es wird in folgender Untersuchung als Symbiose aus materieller und interner immaterieller Ressource verstanden (vgl. Abbildung 3.5). Mit seinen Hardwarekomponenten des physischen Objekts und des eingebetteten Systems wird ein CPS als Sacheinrichtung und damit als materielle Ressource aufgefasst. Allerdings ist die Software und die Möglichkeit zur Ansammlung, Analyse und Auswertung unterneh-

---

<sup>4</sup>Vgl. GÖTZE, U.; LINDNER, R. u. a.: (eniPROD), S.3.

mensinterner und -übergreifender Daten, die die Basis für die Funktionalität der I4.0 darstellt, nicht zu vernachlässigen. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit angenommen, dass CPS ebenfalls eine bedeutende immaterielle interne Ressource bezgl. Organisation und Informationen im Unternehmen darstellt. Darüber hinaus ist festzuhalten, dass die Auswirkungen der Chancen und Risiken von CPS eine enorme Tragweite besitzen (vgl. Kapitel 2.4). Dies hat zur Folge, dass bei der Integration von CPS ebenfalls Veränderungen im ökologischen und sozialen Kapital zu erwarten sind. Aus diesem Grund wird eine Bewertung von CPS unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeit gerechtfertigt.

Unter *Systemgrenze* werden in diesem Zusammenhang physische und zeitliche Restriktionen verstanden. Erstere beziehen sich auf den Einsatzort des CPS. Dazu wird angenommen, dass das Betrachtungsobjekt innerhalb eines Unternehmens im Bereich I4.0 in Betrieb genommen wird. Der zeitlich bedingte Umfang beträgt mehrere Perioden, mindestens aber 15 Jahre, um die Betriebszeit der Komponenten eines CPS zu inkludieren (vgl. Kapitel 2.2).

Das *Bewertungsziel* ist die nachhaltige Analyse und Beurteilung von CPS unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeit. Darüber hinaus werden Folgen der Integration von CPS abgeschätzt und Gestaltungs- und Handlungsmöglichkeiten abgeleitet (vgl. Kapitel 3.4.1). Weiterhin muss zwischen zwei verschiedenen unternehmensinternen Absichten unterschieden werden. Die Thematiken von CPS und Nachhaltigkeit, insbesondere deren Chancen und Risiken, sind Unternehmen gegenwärtig bekannt und werden sowohl in der Praxis als auch in der Literatur interdisziplinär diskutiert (vgl. Kapitel 2.4). Daher ist erstens für Unternehmen von großem Interesse zu überprüfen, ob sich eine Investition in CPS zukünftig und nachhaltig lohnt. Zweitens ist anschließend zu hinterfragen, wie sich die in Betrieb befindlichen CPS auf das Unternehmensgeschehen nachhaltig auswirken. Um diese elementaren Fragestellungen zu beantworten, bedarf es geeigneter Bewertungskonzepte für CPS. Diese werden in der nachfolgenden Untersuchung ermittelt. Aus den betrieblichen Bewertungszielen abgeleitet, begründet sich folgende primäre Zielstellung für die folgende Untersuchung:

- Welche Instrumente eignen sich für die Bewertung von CPS unter Einbezug der Nachhaltigkeit für Unternehmen?

Dazu müssen folgende Fragen untersucht werden, die zur Beantwortung der oben genannten Frage beitragen:

- Welche Kriterien sind unabdingbar für eine Bewertung von CPS unter Einbezug der Nachhaltigkeit?
- Welche bestehenden Controllinginstrumente eignen sich zur Bewertung von CPS unter Einbezug der Nachhaltigkeit?
- Welche Bewertungsansätze bestehen gegenwärtig speziell für CPS?
- Können geeignete Bewertungsinstrumente die Chancen und Risiken von CPS und Nachhaltigkeit operationalisieren?

Die Fragestellungen werden mithilfe der nachfolgenden Untersuchung beantwortet. Deren Ergebnisse werden in Kapitel 4.6 zusammengeführt und dargestellt.

#### 4.4 Definition und Gewichtung der Untersuchungskriterien

Die Kriterien, die zur Untersuchung von CPS und in Hinblick auf Nachhaltigkeit herangezogen werden, leiten sich aus der Thematik des Bewertungsobjekts (vgl. Kapitel 2) und der Nachhaltigkeit (vgl. Kapitel 3) ab. Zu erstem Bereich gehört die *Berücksichtigung unterschiedlicher technischer Aufbauarten* von CPS. Die Unterscheidung betrifft auf der einen Seite die Erweiterung des physischen Objekts zu einem CPS, auf der anderen Seite die vollkommene CPS-Lösung (vgl. Kapitel 2.3). Daraus ergeben sich unterschiedliche Betriebszeiten und damit *differente Nutzungsdauern* (vgl. Kapitel 2.3), die in einer Bewertung möglichst berücksichtigt werden sollen. Daraus folgt der *Einbezug mehrerer Perioden*, der jedoch nicht zwangsläufig auf die Nutzungsdauer beschränkt ist. Eines der wichtigsten Merkmale der I4.0 betrifft die Wirkungsweite des CPS (vgl. Kapitel 2.2 und 2.3). Demnach soll die *gesamte Wertschöpfungskette*, in welche CPS involviert sind, beachtet werden.

Die Kriterien, die sich aus Kapitel 3 ableiten, beziehen sich auf die *Beachtung der ökonomischen, sozialen und ökologischen Dimension*. Als erstrebenswert gilt, dass durch die Bewertungsinstrumente möglichst sämtliche Dimensionen in Bezug auf CPS untersucht werden. Erst dann liegen vollkommene Grundlagen zur Entscheidungsunterstützung vor. Darauf aufbauend ist es von großem Interesse den *vollständigen Lebenszyklus von CPS und seiner Komponenten* innerhalb einer Bewertungsmethode zu berücksichtigen. Ziel dieses Kriteriums ist es, sämtliche Auswirkung eines CPS abzuschätzen und zu bewerten.

Folgende Abbildung gibt einen zusammenfassenden Überblick auf die Kriterien, die zur Untersuchung der Bewertungsinstrumente beitragen:

Nr.	Kriterien zur Untersuchung von CPS unter Einbezug der Nachhaltigkeit
Kriterien aus der Thematik CPS (vgl. Kapitel 2)	
1.	Berücksichtigung unterschiedlicher technischer Aufbauarten
2.	Berücksichtigung unterschiedlicher Nutzungsdauern von Komponenten
3.	Einbezug mehrerer Perioden
4.	Einbezug der Auswirkungen auf gesamte Wertschöpfungskette
Kriterien aus der Thematik Nachhaltigkeit (vgl. Kapitel 3)	
5.	Beachtung ökonomischer Dimensionen
6.	Beachtung sozialer Dimensionen
7.	Beachtung ökologischer Dimensionen
8.	Einbezug des gesamten Lebenszyklus des CPS und seiner Komponenten

Tabelle 4.1: Kriterien zur Untersuchung der Bewertungsinstrumente, eigene Tabelle

Die Kriterien können innerhalb der einzelnen Bewertungsansätze unterschiedlich stark ausgeprägt sein. Aus diesem Grund bietet sich folgende Abstufung an:

Vollkommen erfüllt	●
Zum Teil erfüllt	◐
Nicht erfüllt	○

Tabelle 4.2: Legende der Kriterienausprägungen, eigene Tabelle

Ferner ist festzuhalten, dass sämtliche Kriterien, ungeachtet welcher Dimension oder Thematik sie angehören, gleichgewichtet in die Untersuchung eingehen. Dies begründet sich aus der ursprünglichen Idee der Nachhaltigkeit, die besagt, dass die ökologischen, ökonomischen und sozialen Segmente gleichwertig und -rangig verfolgt werden, um zu einer nachhaltigen Entwicklung beizutragen (vgl. Kapitel 3). Aus diesem Grund wird folgend zur Visualisierung ebenfalls das gleichschenklige IND (vgl. Kapitel 3.2) herangezogen.

## 4.5 Untersuchung von Bewertungsansätzen für cyber-physische Systeme

### 4.5.1 Übersicht der zu untersuchenden Bewertungsansätze

Um dem Untersuchungsrahmen und dem Bewertungsobjekt (CPS) gerecht zu werden, müssen einige ausgewählte Instrumente (vgl. Kapitel 3.3.2) vorab eliminiert werden. Zunächst werden zukunftsorientierte Ansätze betrachtet: Im Bereich des *Investitionsmanagements* bei Vorteilhaftigkeitsentscheidungen mit einer Zielgröße wird auf die Untersuchung statischer Instrumente verzichtet, da diese einen konkreteren zeitlichen Anfall von Zahlungen über mehrere Perioden hinweg nicht berücksichtigen. Daher werden

in Kapitel 4.5.2 die dynamischen Modelle untersucht, welche eine detaillierter Planung und Bewertung aufgrund der Betrachtung zukünftiger Ein- und Auszahlungen zulassen. Da auf die KW-Methode und ihre Erweiterung durch Ersatz- und Investitionszeitpunkt tiefgründiger eingegangen wird, werden Annuitätenmethode, dynamische Amortisationsrechnung und die Methode des internen Zinsfußes thematisch nur angeschnitten. Weiterhin bieten *Instrumente der Unternehmensstrategie* primär eine Bewertung in Bezug auf Vision und Ziele des gesamten Unternehmens. Es ist daher anzunehmen, dass eine Bewertung konkreter Untersuchungsobjekte zu aufwendig und daher nicht zielführend erscheint. Aus diesem Grund werden diese zugehörigen Instrumente folgend vernachlässigt. Das LCSA repräsentiert ein umfängliches lebenszyklusbezogenes Instrument, welches LCA, SLCA und LCC in seinem Aufbau inkludiert. Infolgedessen werden die einzelnen Bestandteile nicht einzeln, sondern zusammenhängend im integrierten LCSA bewertet. Im Bereich vergangenheitsbezogener Ansätze ergeben sich folgende Änderungen: In der Kostenrechnung wird lediglich die Prozesskostenrechnung betrachtet, da CPS v.a. (über)betriebliche Prozesse verändern. Das Benchmarking im Bereich des Kostenmanagements entfällt ebenfalls, da sich sein Bezugsobjekt vorwiegend auf Unternehmensvergleiche und weniger auf Technologien bezieht. Folgende Tabelle gibt eine abschließende Übersicht über die ausgewählten und zu untersuchenden Bewertungsansätze:

	Zeitorientierung	
	Zukunft	Vergangenheit
Kostenrechnung und -management		
Kostenrechnung		
Prozesskostenrechnung		×
Kostenmanagement		
TC	×	
Investitionsmanagement		
Vorteilhaftigkeitsentscheidung mit einer Zielgröße		
KW-Methode	×	
Vorteilhaftigkeitsentscheidung mit mehreren Zielgrößen		
Nutzwertanalyse	×	
Lebenszyklusbezogene Instrumente		
LCSA	×	
Spezielle Ansätze mit CPS-Thematik		
Prozessorientierte Potenzialanalyse	×	
Ansatz zur Komplexitätsbewertung von CPS		×

Tabelle 4.3: Ausgewählte und spezielle zu untersuchende Instrumente und deren Zeitbezug, eigene Tabelle

Die Reihenfolge der zu untersuchenden Instrumente innerhalb der Kapitel 4.5.2 und 4.5.3 orientiert sich an Tabelle 4.3. Weiterhin ist ersichtlich, dass aus jedem vorgestellten Bereich der Controllinginstrumente (vgl. Kapitel 3.4.2) genau ein Ansatz ausgewählt wur-

de, der anschließend näher untersucht wird. Zwei spezielle Ansätze mit CPS-Thematik runden die Untersuchung ab.

#### 4.5.2 Untersuchung zukunftsorientierter Bewertungsansätze

Der Reihenfolge der Tabelle 4.3 folgend, wird zunächst das Kostenmanagement mit dem TC untersucht. Dieses ist in der Literatur ebenfalls unter dem Synonym des marktorientierten Zielkostenmanagement aufzufinden.<sup>5</sup> Das TC besitzt in seiner klassischen Ausprägung das *Ziel*, produktbezogene Unternehmensaktivitäten markt-, lebenszyklus- und kostenorientiert zu steuern und damit die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens zu erhöhen.<sup>6</sup> Die Steuerung erfolgt vorwiegend während der frühen Phase des Produktes, d.h. der Produktentwicklung. Fraglich ist, ob als Bezugsobjekt ebenfalls CPS und seine Komponenten in Bezug auf das zu fertigende Produkt in Frage kommen. Dies soll im Folgenden aus Sicht des Verwenders von CPS erörtert werden. GÖTZE; WEBER u. a. liefern dazu erste Anregungen in Form eines werkstofforientierten TC und damit das Rahmenkonzept für die Untersuchung.<sup>7</sup> Das TC gliedert sich in nachstehende *Verfahrensschritte*:<sup>8</sup>

1. Entwurf eines ersten Produktplans
2. Festlegung der Zielkosten
3. Zielkostenbestimmung, -spaltung und -erreicherung in Bezug auf das Produkt
4. Zielkostenverbesserung und -einhaltung

Zu Beginn findet eine Ausarbeitung des zu fertigenden Produkts (1.) statt. Dies bedeutet konkret, dass der CPS-Bezug im Produktplan vorliegt und damit folgend die Bedeutung von CPS für das Unternehmen in diesem Schritt geklärt wird. Dieser liegt primär die Unternehmensstrategie und damit einhergehend der Einsatzbereich und die Funktionalität des CPS zu Grunde. Vorstellbar wäre bspw., dass ein Unternehmen eine Präferenzstrategie<sup>9</sup> anstrebt. So können bspw. durch Zeitvorteile Alleinstellungsmerkmale gegenüber Wettbewerben in der Branche und damit Wettbewerbsvorteile aufgebaut werden. Diese können durch eine zügigere Bearbeitung von Produkten in der Produktion durch CPS als Fertigungssystem realisiert werden. Ein anderer Ansatz stellt die Überlegungen eines umweltbewussten produzierenden Unternehmens dar. Dieses könnte bspw. das Ziel verfolgen, mit einem cyber-physischen Fertigungssystem eine automatische und umweltverträgliche Auswahl an Rohstoffen vorzunehmen, die anhand der Kundenbedingungen an das Endprodukt gefordert sind. Die Beispiele zeigen, dass diese Ausarbeitung einerseits unternehmensabhängig ist. Andererseits zeigt sie auch, dass CPS je nach Anwendungsfall mit verschiedenen Komponenten aufgebaut und programmiert werden müssen.

---

<sup>5</sup>Vgl. GÖTZE, U.; WEBER, T. u. a.: (Werkstoffe), S.566.

<sup>6</sup>Vgl. GÖTZE, U.; WEBER, T. u. a.: (Werkstoffe), S.566.

<sup>7</sup>Vgl. ebenda, S.566-572.

<sup>8</sup>Vgl. ebenda, S.566; GÖTZE, U.: (Kostenrechnung), S.283.

<sup>9</sup>Anmerkung: Als Präferenzstrategie wird jene strategische Ausrichtung bezeichnet, die sich auf ein einzigartiges Produktmerkmal bezieht, vgl. BECKER, J.: (Marketing-Konzeption), S.231.

Nachfolgend findet die Festlegung der Zielkosten des Produktes (2.) statt, indem der vom Markt erlaubte Preis des Produktes ermittelt wird. Anschließend folgt die Subtraktion des Gewinnanteils und der Gemeinkosten. Eine Berücksichtigung der durch CPS verursachten Kosten findet nur unzulänglich statt, da erstens das Betrachtungsobjekt des Instruments das Produkt darstellt. Zweitens werden über Gemeinkosten, bspw. durch Kosten für Entwicklung, Kosten der Logistikaktivitäten oder Wagniskosten<sup>10</sup>, monetäre Belastungen des CPS auf das Produkt übertragen. Anschließend erfolgt die Zielkostenbestimmung, -spaltung und -erreicherung in Bezug auf Entwicklung des Produktes (3.). In dieser Phase wird das Produkt und seine Komponenten so konstruiert und geplant, dass die zuvor festgelegten Zielkosten eingehalten werden. In der Zielkostenspaltung werden die Zielkosten auf einzelne Bestandteile des Produktes aufgeschlüsselt. In dieser Phase findet eine Umlegung der gesamten Gemeinkosten auf einzelne Komponenten anhand ihres Nutzens am Produkt statt. Parallel zu (2.) findet die Berücksichtigung der CPS lediglich innerhalb der Gemeinkosten statt. Der letzte Schritt des Verfahrens umfasst einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess (4.), bei dem die geplanten Kosten überwacht und ggf. gesteuert werden. In diesem Vorgehen werden Desinvestitionen von Fertigungsanlagen berücksichtigt. Denkbar ist, dass diese auf cyber-physische Fertigungssysteme übertragen werden können. Hinsichtlich der *Beurteilung* anhand der eigens aufgestellten Kriterien ist festzuhalten, dass CPS aus Verwendersicht nur unzulänglich, d.h. über die Gemeinkosten eines zu fertigenden Produktes, beachtet werden. Aus diesem Grund werden die Kriterien aus der Thematik CPS nur unzureichend berücksichtigt. Aspekte der Nachhaltigkeit sind in diesem Modell - in Bezug auf CPS - ebenfalls nur schwach ausgeprägt. Hervorzuheben ist die Beachtung der ökonomischen Dimension in Form von monetären Werten (Gemeinkosten). Der Lebenszyklusbezug bezieht sich in diesem Vorgehen lediglich auf das Produkt, auch wenn einzelne Phasen von CPS, bspw. Desinvestitionen zu späteren Zeitpunkten, einbezogen werden. Ein Bezug zu ökologischen oder sozialen Aspekten findet im Zusammenhang mit CPS nicht statt. Als *Fazit* ist festzuhalten, dass die Kriterien in Hinblick auf das Produkt sehr gut berücksichtigt werden, wenn die geforderte Bedeutung aus Kundensicht vorliegt. Daher ist es vorstellbar, dass sich CPS als Produkt aus Herstellersicht mithilfe des TC beurteilen lässt. Aus Verwendersicht gilt dieses Instrument als eher ungeeignet.<sup>11</sup> Es ergibt sich abschließend folgende Beurteilung:

---

<sup>10</sup>Anmerkung: Unter Wagniskosten werden betriebliche Versicherungsprämien verstanden, die durch außerordentliche Vorgänge in anfallenden Kosten einbezogen werden, vgl. GÖTZE, U.: (Kostenrechnung), S.62 f.

<sup>11</sup>Anmerkung: Hervorzuheben ist, dass in der Literatur bereits Ansätze in Hinblick auf die ökologische und ökonomische Vereinbarung im („grünen“) TC bestehen, die aber noch nicht vollends ausgereift sind, vgl. BERLIN, S.: (grüner Target Costing-Ansatz), S.231 ff.

Nr.	Untersuchung des Target Costings	Ausprägung
Kriterien aus der Thematik CPS (vgl. Kapitel 2)		
1.	Berücksichtigung unterschiedlicher technischer Aufbauarten	○
2.	Berücksichtigung unterschiedlicher Nutzungsdauern von Komponenten	○
3.	Einbezug mehrerer Perioden	◐
4.	Einbezug der Auswirkungen auf gesamte Wertschöpfungskette	○
Kriterien aus der Thematik Nachhaltigkeit (vgl. Kapitel 3)		
5.	Beachtung ökonomischer Dimensionen	●
6.	Beachtung sozialer Dimensionen	○
7.	Beachtung ökologischer Dimensionen	○
8.	Einbezug des gesamten Lebenszyklus des CPS und seiner Komponenten	◐

Tabelle 4.4: Ausprägungen der Kriterien für das Target Costing, eigene Tabelle

Folgend werden Instrumente des Investitionsmanagements beurteilt. Zu den dynamischen Instrumenten gehören die KW- und Annuitätenmethode sowie die dynamische Amortisationsrechnung und die Methode des internen Zinsfußes. Diese haben zum Ziel, eine Vorteilhaftigkeitsentscheidung zwischen Investitionsalternativen zu treffen. Sie besitzen folgende Merkmale:<sup>12</sup>

- Einbezug einer monetären Zielgröße und mehrerer Perioden
- Vorlage sicherer Modelldaten und eines einheitlichen Kalkulationszinsatzes
- Prognose von Ein- und Auszahlungen der einzelnen Investitionsalternativen
- Nicht-Existenz von Wechselbeziehungen oder Abhängigkeiten zwischen Investitionsalternativen
- Vorgabe von Nutzungsdauern der Investitionsobjekt (IO)

Zunächst wird die **KW-Methode** vorgestellt. Dieses Instrument besitzt die *Zielgröße* des KW. Dieser wird als Summe über alle auf einen Zeitpunkt auf- bzw. abgezinsten Ein- bzw. Auszahlungen ( $e_t$  bzw.  $a_t$ ) definiert:<sup>13</sup>

$$KW = \sum_{t=0}^T (e_t - a_t) \cdot q^{-t} \quad (4.1)$$

mit folgenden Indizes und Parametern:

<sup>12</sup>Vgl. GÖTZE, U.: (Investitionsrechnung), S.55 f.

<sup>13</sup>Vgl. ebenda, S.79.

$t$	=	Zeitindex
$T$	=	Letzter Zahlungszeitpunkt
$e_t$	=	Einzahlungen im Zeitpunkt $t$
$a_t$	=	Auszahlungen im Zeitpunkt $t$
$q^{-t}$	=	Abzinsungsfaktor für den Zeitpunkt $t$

In dieser Arbeit wird angenommen, dass sich der KW auf den Zeitpunkt des Planungsbeginns bezieht.<sup>14</sup> Dies bedeutet konkret, dass sämtliche Aus- und Einzahlungen auf den Zeitpunkt abgezinst werden, in dem eine Entscheidung darüber getroffen wird, ob eine Investition in CPS von Vorteil ist. Der KW stellt damit einen Barwert dar, da zukünftig anfallende Aus- und Einzahlungen auf die Gegenwart abgezinst werden. Zur Beurteilung der Vorteilhaftigkeit gilt, dass ein IO absolut vorteilhaft ist, wenn der KW größer null beträgt. Weiterhin gilt, dass ein IO relativ vorteilhaft ist, wenn sein KW größer ist als der eines anderen zur Auswahl stehenden IO. In Hinblick auf die *Überprüfung der Kriterien* bietet es sich an, die vorher beschriebene Formel in weitere Bestandteile aufzuschlüsseln. Dazu zählen erstens die explizite Betrachtung der Anschaffungsauszahlung ( $A_0$ ) eines CPS und zweitens der Ausweis des Liquidationserlöses zum Ende des Planungszeitraumes ( $L_T$ ). Es ergibt sich folgende Formel:

$$KW = -A_0 + \sum_{t=1}^T (e_t - a_t) \cdot q^{-t} + L_T \cdot q^{-T} \quad (4.2)$$

mit folgenden zusätzlichen Indizes und Parametern:

$A_0$	=	Anschaffungsauszahlung in $t=0$
$L_T$	=	Liquidationserlös am Ende des Planungszeitraumes
$q^{-T}$	=	Abzinsungsfaktor am Ende des Planungszeitraumes

Mit dieser detaillierteren Formel ist es möglich, die unterschiedlichen technischen Aufbauarten von CPS transparenter zu berücksichtigen. Vollkommene CPS-Lösungen können mit bereits existierenden Anlagen hinsichtlich ihres gesamten KW, ihrer Auszahlungen für Anschaffung und ihres Liquidationserlöses verglichen werden. Empfehlenswert ist, dass Anschaffungsauszahlungen nicht als alleiniges Entscheidungskriterium verwendet werden. Dieser Umstand kann dazu führen, dass die Alternative gewählt wird, deren Anschaffungsauszahlung geringer gegenüber einer weiteren Alternative ist. Die vermeintliche Einsparung zu Beginn des Planungszeitraumes kann sich als Fehlentscheidung herausstellen, wenn die Alternative mit geringerer Anschaffungsauszahlung höhere Folgeauszahlungen, bspw. für Instandhaltung, mit sich bringt. Bei Erweiterungen von bestehenden Anlagen zu CPS können die unterschiedlichen Bestandteile in Formel (4.2) insofern berücksichtigt werden, als dass ihre Anschaffungsauszahlungen aufsummiert oder einzeln aufgelistet werden. Des Weiteren besitzen die einzelnen Komponenten unterschiedliche Nutzungsdauern (vgl. Kapitel 2.3), sodass wiederkehrende Anschaffungs-

---

<sup>14</sup>Vgl. GÖTZE, U.: (Investitionsrechnung), S.78 ff.

auszahlungen für die Hardware bzw. Software des eingebetteten Systems nach 7,5 bzw. 0,75 Jahren beachtet werden. Dies bedeutet weiterhin, dass Nutzungsdauern einzelner Bestandteile sowie mehrere Perioden berücksichtigt werden. Ein Bezug zur Wertschöpfungskette besteht nicht. Da die KW-Methode lediglich einen monetären Zielwert ausgibt, bezieht sie ausschließlich die ökonomische Dimension ein. Eine Aussage hinsichtlich ökologischer oder sozialer Auswirkungen kann folglich nicht getroffen werden. Ebenfalls werden die Lebenszyklen des CPS und seiner Komponenten nicht explizit berücksichtigt. Es besteht ausschließlich Bezug zur Betriebsdauer des Betrachtungsobjekts, welche nur einen Teil des Lebenszyklus darstellt. Als *Fazit* kann festgehalten werden, dass mit der KW-Methode 75 Prozent der CPS-Kriterien abgedeckt werden. Schwächen bestehen hinsichtlich des Bezuges zur Wertschöpfungskette. Parallel dazu werden im Bereich der Nachhaltigkeit 75 Prozent der Kriterien nicht berücksichtigt. Offen bleibt, inwiefern soziale und ökologische Dimensionen integriert sowie der Lebenszyklusbezug hergestellt werden können. Es ergibt sich folgende finale Beurteilung:

Nr.	Untersuchung der KW-Methode	Ausprägung
Kriterien aus der Thematik CPS (vgl. Kapitel 2)		
1.	Berücksichtigung unterschiedlicher technischer Aufbauarten	●
2.	Berücksichtigung unterschiedlicher Nutzungsdauern von Komponenten	●
3.	Einbezug mehrerer Perioden	●
4.	Einbezug der Auswirkungen auf gesamte Wertschöpfungskette	○
Kriterien aus der Thematik Nachhaltigkeit (vgl. Kapitel 3)		
5.	Beachtung ökonomischer Dimensionen	●
6.	Beachtung sozialer Dimensionen	○
7.	Beachtung ökologischer Dimensionen	○
8.	Einbezug des gesamten Lebenszyklus des CPS und seiner Komponenten	○

Tabelle 4.5: Ausprägungen der Kriterien für die KW-Methode, eigene Darstellung

Die KW-Methode kann nachfolgend für die Berechnung eines Ersatzzeitpunktes genutzt werden, in dem eine bestehende Anlage durch eine vollkommene CPS-Lösung ersetzt wird. Dazu muss sich im Vorhinein die potenzielle Nachfolgealternative als absolut bzw. im Vergleich zu anderen Alternativen als relativ vorteilhaft erwiesen haben. Es handelt sich bei der Berechnung des Ersatzzeitpunktes um eine ex-post-Entscheidung, da die bestehende Anlage bereits in Betrieb genommen wurde. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass diese im Anschluss durch eine vollkommene CPS-Lösung ersetzt wird. Jedoch führen CPS durch ihren differenten technischen Aufbau zu abweichenden Zahlungsreihen. Dies bedeutet konkret, dass ein Ersatzzeitpunktmodell mit endlich vielen Nachfolgeobjekten nicht-identischer wirtschaftlicher Auswirkungen angewendet werden kann.<sup>15</sup> Im Modell wird unterstellt, dass Anschaffungsauszahlungen, Liquidationserlöse

<sup>15</sup>Vgl. GÖTZE, U.: (Investitionsrechnung), S.254.

und Rückflüsse sowie Planungszeitraum und Realisationszeitpunkte von CPS als Nachfolgeobjekt bekannt sind. Darüber hinaus wird die feste Nutzungsdauer von Objekten, die zuvor in der KW-Methode als Annahme galt, aufgehoben. Es gilt, dass der Ersatzzeitpunkt dann optimal ist, wenn in diesem der Gesamt-KW aus der alten Anlage und des CPS maximal ist. Fraglich ist, inwiefern die Modellanforderungen in der Praxis erfüllt werden können. Aufgrund der hohen Spezifität jedes einzelnen CPS lassen sich Zahlungsreihen nicht verallgemeinern, sondern müssen vom Unternehmen im separaten Anwendungsfall ermittelt und prognostiziert werden.

Der Investitionszeitpunkt, in dem eine Erweiterung einer bestehenden Anlage zu einem CPS getätigt werden sollte, kann ebenfalls mit Hilfe der KW-Methode berechnet werden.<sup>16</sup> Allerdings sollten Einflussfaktoren beachtet werden, die Auswirkungen auf die zu prognostizierten Zahlungsgrößen besitzen. Dazu gehören - in Bezug auf CPS - v.a. der technische Fortschritt und die Spezifität der Anlage.<sup>17</sup> Da CPS und seine Komponenten fortlaufend weiter konzipiert werden und gegenwärtig die Entwicklung dieser Bauten noch andauert, ist zu vermuten, dass entferntere Investitionszeitpunkte zu höherem technischen Fortschritt führen. Daraus könnten Verbesserungen hinsichtlich der Zahlungsreihen, bspw. durch verminderte Auszahlungen der Instandhaltung, resultieren. Folglich bedeutet dies, dass die Zahlungen vom Investitionszeitpunkt abhängig sind. Die zur Erweiterung der bestehenden Anlage benötigten Bauteile, bspw. das eingebettete System mit Hard- und Software, werden speziell für ebendiese Anlage gefertigt und programmiert. Das bedeutet, dass eine hohe Spezifität der Komponenten und letztendlich der erweiterten Anlage vorliegt und alternative Einsatzmöglichkeiten der Bauteile unwahrscheinlich erscheinen. Für den optimalen Investitionszeitpunkt wird angenommen, dass unterschiedliche Zahlungsreihen zwischen der Ausgangsanlage und der erweiterten Anlage zum CPS prognostiziert werden können. Es wird weiterhin unterstellt, dass keine Desinvestition der Anlagenerweiterung in  $t=1$  getätigt werden kann, wenn in  $t=0$  investiert wurde. Die Begründung liegt in der hohen Spezifität, die sich in  $t=1$  durch einen niedrigen Liquidationserlös der Anlage oder hohe Demontageauszahlungen der CPS-Bauteile niederschlägt. Um die mathematische Vorgehensweise darzustellen, wird folgend lediglich von zwei Perioden ( $\tau = 0, 1$ ), in denen investiert werden kann ausgegangen. Die sofortige Investition in  $t=0$  gilt als vorteilhaft, wenn ihr KW ( $KW_0$ ) größer ist als der auf  $t=0$  abgezinste KW ( $KW_1$ ) bei Investition in  $t=1$ . Daraus ergibt sich folgender mathematischer Zusammenhang:<sup>18</sup>

$$KW_0 > q^{-1} \cdot KW_1 \quad (4.3)$$

---

<sup>16</sup>Vgl. ebenda, S.284 ff.

<sup>17</sup>Anmerkung: Weitere Einflussfaktoren sind Vorreitervor- und nachteile sowie Wechselwirkungen zwischen differenten Investitionsobjekten, vgl. GÖTZE, U.: (Investitionsrechnung), S.284 f.

<sup>18</sup>Vgl. GÖTZE, U.: (Investitionsrechnung), S.288 f.

bzw.

$$-A_0 + \sum_{t=1}^{T_0} R_{0t} \cdot q^{-t} + L_0 \cdot q^{-T_0} > q^{-1} \cdot (-A_1 + \sum_{t=2}^{T_1+1} R_{1t} \cdot q^{-t+1} + L_1 \cdot q^{-T_1}) \quad (4.4)$$

mit folgenden Indizes und Parametern:

- $A_\tau$  = Anschaffungsauszahlung der Investition im Zeitpunkt  $\tau = 0, 1$
- $t$  = Zeitindex bezogen auf Beginn des Planungszeitraums
- $L_\tau$  = Liquidationserlös am Ende der Nutzungsdauer der in Zeitpunkt  $\tau$  durchführbaren Investition
- $q^{-t}$  = Abzinsungsfaktor des Zeitindex
- $T_\tau$  = Nutzungsdauer der durchführbaren Investition im Zeitpunkt  $\tau$
- $R_{\tau t}$  = Rückflüsse zum Zeitpunkt  $t$  der im Zeitpunkt  $\tau$  durchführbaren Investition

Eine Investition in  $t=0$  ist u.a. umso vorteilhafter, je kleiner die Differenz der Barwerte der gegenwärtigen und folgenden Rückflüsse ist. Der zuvor beschriebene technische Fortschritt wirkt eher negativ auf diesen Zusammenhang, da dieser eine hohe positive Differenz und somit eher unvorteilhaft auf eine Investition in  $t=0$  bewirkt. In der Praxis kann der Fall auftreten, dass mehr als zwei Zeitpunkte betrachtet werden. Dann handelt es sich um mehrstufige, komplexere Modelle, die mittels dynamischer Programmierung gelöst werden können.<sup>19</sup>

Die Annuitätenmethode, Interner Zinssatz-Methode sowie die dynamische Amortisationsrechnung bauen auf dem KW-Modell auf, sodass hinsichtlich ihrer Bewertung von CPS keine signifikanten Unterschiede zu erwarten sind. Jedoch besitzen die drei Methoden differente monetäre Zielgrößen. Diese werden im folgenden als Ergänzung der KW-Methode - und somit nicht als eigenständige Bewertungsinstrumente - kurz dargestellt. Die Zielgröße der Annuitätenmethode ist die Annuität. Sie gibt den monetären Betrag an, den der Investor in jeder Periode entnehmen kann, wenn dieser die Investition durchführt.<sup>20</sup> Mit der Internen Zinssatz-Methode wird der Interne Zinssatz berechnet, der zu einem KW von null führt und die Verzinsung des Investitionsobjekts angibt. Die dynamische Amortisationsrechnung bezieht sich auf die Zielgröße der Amortisationszeit. Diese gibt den Zeitraum an, in dem das eingesetzte Kapital zurückgewonnen wird.

Weiterhin existieren Modelle, die *mehrere Zielgrößen* in ihren Entscheidungsprozess einbeziehen. Dazu gehört die **Nutzwertanalyse**. Diese hat zum *Ziel*, die geeignetste Investitionsalternativen anhand verschiedener Zielkriterien zu gewichten und daraus einen Nutzwert zu ermitteln, der eine Aussage über die Vorteilhaftigkeit der Investitionsalternative zulässt. Die Nutzwertanalyse besitzt folgendes *Vorgehen*:<sup>21</sup>

#### 1. Bestimmung der Zielkriterien

<sup>19</sup>Vgl. GÖTZE, U.: (Investitionsrechnung), S.295.

<sup>20</sup>Vgl. ebenda, S.100 ff.

<sup>21</sup>Vgl. ebenda, S.193; SAILER, U.: (Nachhaltigkeitscontrolling), S.251 f.

2. Gewichtung der Zielkriterien
3. Bestimmung der Teilnutzen
4. Ermittlung des Nutzwertes
5. Vorteilhaftigkeitsbeurteilung

Zunächst werden Zielkriterien bestimmt (1.), die operational und nutzenunabhängig formuliert werden sollten.<sup>22</sup> Unter Operationalisierung wird verstanden, dass ein Zielkriterium gemessen und auf einer ordinalen, nominalen oder kardinalen Messskala eingeordnet werden kann. Nutzenunabhängig sind Zielkriterien dann, wenn sie unabhängig voneinander erfüllt werden können und nicht in Wechselbeziehung zueinander stehen.<sup>23</sup> Mehrfachnennungen von Kriterien sollten vermieden werden. Die Erarbeitung von geeigneten Zielkriterien bedarf einer detaillierten und zielorientierten Analyse. Es ist empfehlenswert, eine Zielhierarchie für die Investition in CPS zu erstellen, da diese sich v.a. bei komplexen Investitionen eignet. Zunächst wird ein Oberziel formuliert, welches die Zielstellung der Nutzwertanalyse wiedergibt. Anhand der obersten Zielebene werden Unterziele festgelegt. Letztere sind, wie das Oberziel, abhängig vom Unternehmen. Fraglich ist, inwieweit monetäre Ziele eingeschlossen werden. GÖTZE empfiehlt, monetäre Kriterien in einer Nutzwertanalyse nicht miteinzubeziehen, da diese sehr stark und oft von anderen Kriterien abhängen und somit nicht nutzenunabhängig sind. Nur im Ausnahmefall sollte diese Regelung gelockert werden.<sup>24</sup> Hingegen kann es in Hinblick auf den Einbezug der Nachhaltigkeit von Nöten sein, monetäre Größen einzubeziehen, die die ökonomische Dimension widerspiegeln.<sup>25</sup> Als Beispiel dafür wird der KW genannt.<sup>26</sup> Einigkeit herrscht hingegen darüber, dass ökologische und soziale Kriterien nicht monetarisiert vorliegen sollen.<sup>27</sup> Begründet wird dieser Umstand durch die subjektive Monetarisierung von Energie- und Stoffflüssen innerhalb eines Unternehmens, die zu verzerrten ökologischen und sozialen Kriterien führt.<sup>28</sup> Um den ersten Vorgehensschritt zu visualisieren und zu überprüfen, ob dieser auf CPS übertragbar ist, wurde ein kompaktes Fallbeispiel für CPS entwickelt. Dazu wurde eine beispielhafte und nicht vollständige Zielhierarchie erarbeitet. Ausgangspunkt der Erstellung ist ein fiktives Unternehmen, welches zukünftig ein innerbetriebliches FTS (vgl. Kapitel 2.4), welche als CPS funktionieren, einsetzen möchte. Vorausgesetzt wird, dass mehrere Hersteller am Markt existieren, die unterschiedliche FTS erstellen und zum Kauf anbieten. Diese zur Verfügung stehenden FTS können mit Hilfe einer Nutzwertanalyse verglichen werden, um im Anschluss das geeignetste Objekt für den Betrieb zu ermitteln. Dazu wurde das Oberziel „Auswahl des optimalen FTS“ aufgestellt und im Anschluss Unterziele

---

<sup>22</sup>Vgl. GÖTZE, U.: (Investitionsrechnung), S.193.

<sup>23</sup>Anmerkung: In einigen Fällen lässt sich eine Nutzabhängigkeit nicht vermeiden, welche den Zielfindungsprozess allerdings nicht einschränkt, vgl. GÖTZE, U.: (Investitionsrechnung), S.193 f.

<sup>24</sup>Vgl. GÖTZE, U.: (Investitionsrechnung), S.194.

<sup>25</sup>Vgl. SAILER, U.: (Nachhaltigkeitscontrolling), S.252; COLSMAN, B.: (Nachhaltigkeitscontrolling), S.88.

<sup>26</sup>Vgl. SAILER, U.: (Nachhaltigkeitscontrolling), S.252.

<sup>27</sup>Vgl. ebenda, S.251; SCHALTEGGER, S.; ZVEZDOV, D.: (Nachhaltigkeitsinformationen), S.271.

<sup>28</sup>Vgl. SAILER, U.: (Nachhaltigkeitscontrolling), S.251.

ermittelt. Letztere orientieren sich an den Herausforderungen und Chancen von CPS (vgl. Kapitel 2.4) unter Einbezug der drei Dimensionen. Mögliche Unterziele könnten Funktionalität, ökologische Wirkung und Ergonomie darstellen. Diese können in Zielkriterien aufgegliedert werden. So ist es bspw. sinnvoll, die Funktionalität anhand der Handhabung der Bedienung oder der Fehlerhäufigkeit zu bewerten. Anzumerken ist, dass weitere Unterziele und/oder Kriterien ergänzt werden können.

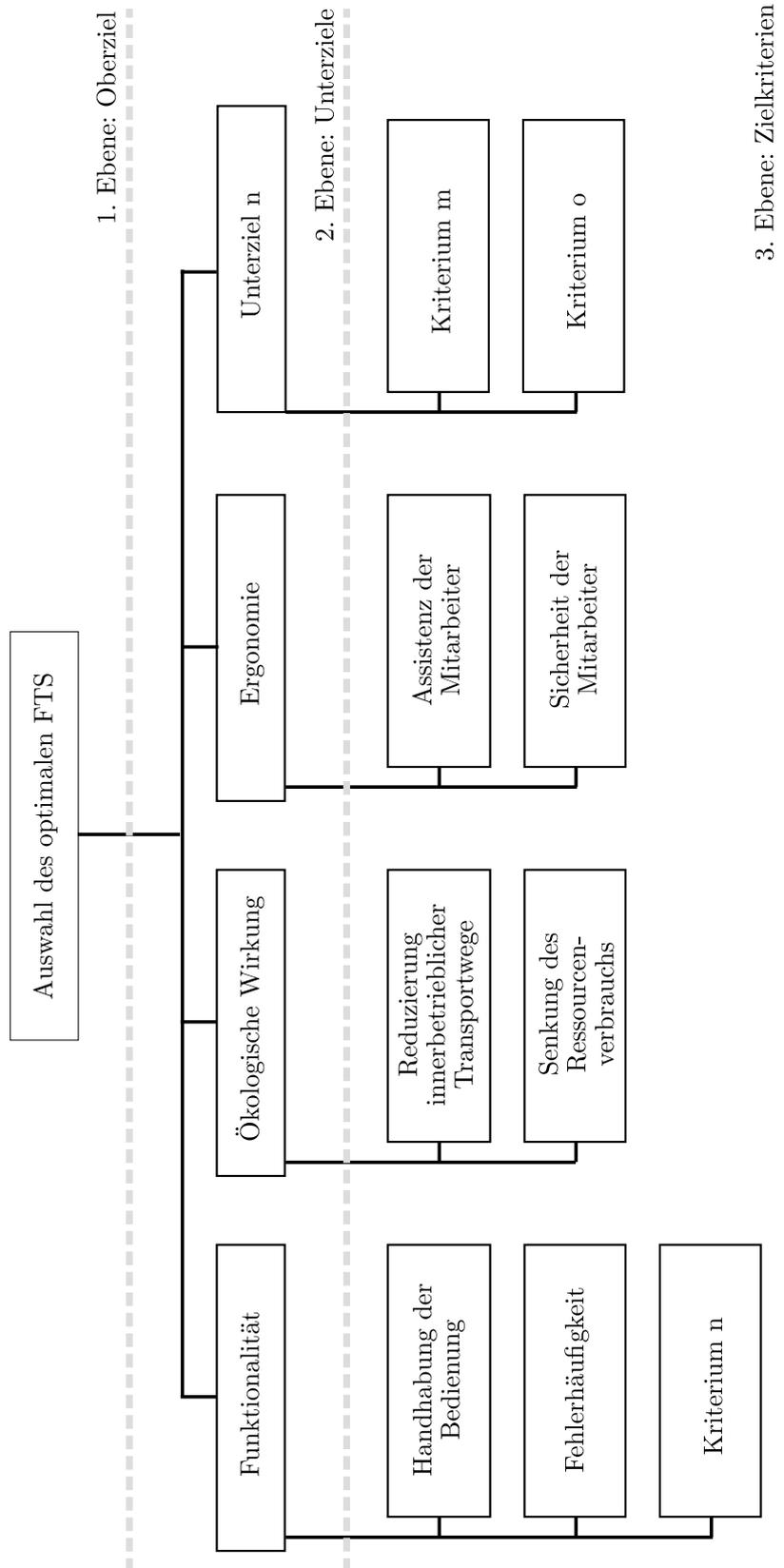


Abbildung 4.2: Ungewichtete Zielhierarchie für ein fiktives FTS, modifiziert und in Anlehnung an GÖTZE, S.198

Im nächsten Schritt werden den Unterzielen und den Zielkriterien Gewichtungsfaktoren (2.) zugeordnet. Darüber existieren ebenfalls unterschiedliche Auffassungen. Gemeinsamer Konsens herrscht in der Literatur darüber, dass die Gewichtungsfaktoren vom Unternehmen selbst gestaltet werden. Unterschiede bestehen in den Empfehlungen selbiger. Zum einen wird vorgeschlagen, die Gewichtungen gemäß der Präferenzen des Erstellers bzw. des Unternehmens zu entwickeln.<sup>29</sup> In Bezug auf das Fallbeispiel ist es möglich, dass das Unternehmen die Ergonomie mehr präferiert als das Kriterium der ökologische Wirkung. Andererseits existieren Empfehlungen, bei denen eine Gleichgewichtung der Unterziele und Kriterien vorgeschlagen wird. Diese Überlegung resultiert daraus, dass eine Bewertung von Objekten unter Einbezug der Nachhaltigkeit erst dann stattfinden kann, wenn ökologische, ökonomische und soziale Kriterien gleichermaßen berücksichtigt werden.<sup>30</sup> Im nachfolgenden Schritt findet die Teilnutzenbestimmung (3.) statt. Zunächst müssen die Ausprägungen der zur Auswahl stehenden Objekte (hier: FTS) in Hinblick auf die Zielkriterien ermittelt werden. Diese Erscheinungsformen können ordinal, nominal oder kardinal vorliegen. Die Handhabung der Bedienung kann bspw. in einer Ordinalskala mit den Rängen sehr leicht, leicht, mittel, schwer und sehr schwer angegeben werden. Nachdem die Ausprägungen für jede Alternative  $i$  und jedes Kriterium  $k$  analysiert wurden, werden sie in einen kardinalen Teilnutzenwert ( $n_{ik}$ ) umgeformt. Dazu bieten sich verschiedene Transformationsfunktionen an.<sup>31</sup> Im vierten Schritt des Verfahrens wird der Nutzwert ( $N_{Ni}$ ) ermittelt. Dieser resultiert aus der Multiplikation der Teilnutzenwerte mit den Kriteriengewichten ( $w_k$ ), die anschließend aufsummiert werden. Daraus ergibt sich für jede Alternative  $i$  ein Nutzwert  $N_{Ni}$ . Im letzten Schritt wird eine Beurteilung zur Vorteilhaftigkeit vorgenommen. Ein IO gilt als absolut vorteilhaft, wenn sein Nutzwert einen vorgegebenen Grenzwert überschreitet. Als relativ vorteilhaft gilt es, wenn sein Nutzwert größer ist als der Nutzwert einer anderen Investitionsalternative. Als Abschluss bietet sich die Visualisierung der einzelnen Alternativen hinsichtlich ihrer Teilnutzenwerte der Kriterien in einem Netzdiagramm an. Folgend wurde ein beispielhaftes Netzdiagramm für zwei FTS mit den oben beschriebenen Unterzielen konzipiert (vgl. Abbildung 4.3). Die Nutzwerte (0 - 1,0) der Alternativen sind willkürlich gewählt.

---

<sup>29</sup>Vgl. GÖTZE, U.: (Investitionsrechnung), S.195.

<sup>30</sup>Vgl. SAILER, U.: (Nachhaltigkeitscontrolling), S.252.

<sup>31</sup>Vgl. GÖTZE, U.: (Investitionsrechnung), S.195.

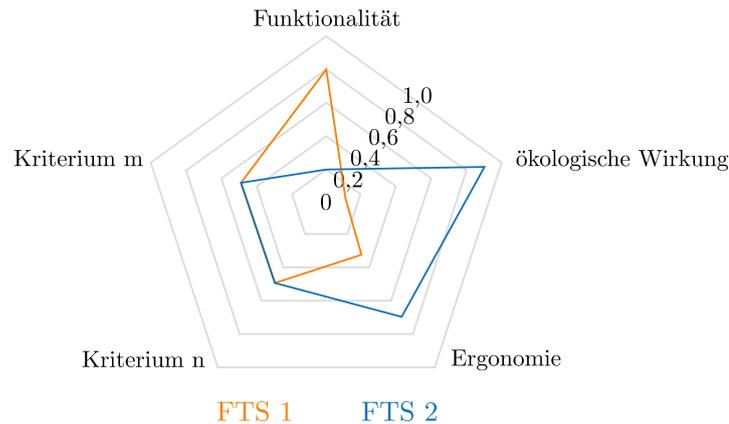


Abbildung 4.3: Netzdiagramm für zwei fiktive FTS, eigene Darstellung

Hinsichtlich der *Überprüfung auf Eignung mittels aufgestellter Kriterien* ist zu sagen, dass die unterschiedlichen technischen Aufbauarten nur teilweise berücksichtigt werden. Zwar können Abstufungen in den Ausprägungen einzelner Zielkriterien vorgenommen werden. Jedoch kann nicht auf einzelne Komponenten explizit eingegangen werden. Nutzungsdauern werden in der Berechnung nicht berücksichtigt. Denkbar wäre aber, je nach Präferenz des Unternehmens, diese als ein Unterziel einzubeziehen. Die Merkmale mehrerer Perioden und Auswirkungen auf die gesamte Wertschöpfungskette bleiben von der Nutzwertanalyse unberührt. Bezüglich der Ausprägung verschiedener Dimensionen ist zu sagen, dass der Einbezug des ökonomischen Segments mittels monetärer Größen umstritten ist. Die soziale und ökologische Dimension kann vollumfänglich in Unterzielen und Zielkriterien verwirklicht werden. Der Einbezug des gesamten Lebenszyklus eines CPS ist nicht möglich. Als *Fazit* kann festgehalten werden, dass die Durchführung einer Nutzwertanalyse unkompliziert und übersichtlich erscheint. Positiv hervorzuheben ist ebenfalls die Berücksichtigung mehrerer Zielgrößen. Hingegen entstehen Ungenauigkeiten aufgrund subjektiver Einschätzungen und Daten. Empfehlenswert ist deshalb, die Nutzwertanalyse nicht als alleiniges Instrument bei Vorteilhaftigkeitsentscheidungen zu nutzen. Das Instrument kann bspw. durch Sensitivitäts- und/oder Risikoanalysen ergänzt werden.<sup>32</sup> Zusammengefasst ergibt sich eine Beurteilung der Nutzwertanalyse, welche v.a. noch ausbaufähig im Bereich der CPS-Thematik und des Lebenszykluskonzepts ist (vgl. Tabelle 4.6).

<sup>32</sup>Vgl. GÖTZE, U.: (Investitionsrechnung), S.200.

Nr.	Untersuchung der Nutzwertanalyse	Ausprägung
Kriterien aus der Thematik CPS (vgl. Kapitel 2)		
1.	Berücksichtigung unterschiedlicher technischer Aufbauarten	◐
2.	Berücksichtigung unterschiedlicher Nutzungsdauern von Komponenten	◑
3.	Einbezug mehrerer Perioden	○
4.	Einbezug der Auswirkungen auf gesamte Wertschöpfungskette	○
Kriterien aus der Thematik Nachhaltigkeit (vgl. Kapitel 3)		
5.	Beachtung ökonomischer Dimensionen	◑
6.	Beachtung sozialer Dimensionen	●
7.	Beachtung ökologischer Dimensionen	●
8.	Einbezug des gesamten Lebenszyklus des CPS und seiner Komponenten	○

Tabelle 4.6: Ausprägungen der Kriterien für die Nutzwertanalyse, eigene Tabelle

Der folgend vorgestellte Instrumentenbereich inkludiert das Lebenszyklusmanagement. Darunter wird die Planung, Steuerung und Kontrolle sämtlicher Prozesse über den Lebenszyklus eines Objektes verstanden.<sup>33</sup> Als Lebenszyklus ist in vorliegender Arbeit der Zeitraum von der Entwicklung über die Betriebszeit bis hin zur Entsorgung und/oder Veräußerung eines gesamten CPS und/oder einzelner Komponenten zu verstehen.<sup>34</sup> In der Literatur bestehen verschiedenartige Lebenszyklusmodelle. Eine Möglichkeit, den Lebenszyklus von CPS zu betrachten, ist das Konzept des Systemlebenszyklus, das v.a. für komplexe Investitionsgüter geeignet ist.<sup>35</sup> Das **LCSA**, ebenfalls lebenswegbasierte Nachhaltigkeitsbewertung genannt, greift den Lebenszyklusbezug auf.<sup>36</sup> Das Instrument hat zum *Ziel*, die umfängliche Wirkung ökologischer, sozialer und ökonomischer Aspekte über den gesamten Lebenszyklus des Objektes zu beurteilen, um folgend die Nachhaltigkeit zukünftig zu verbessern.<sup>37</sup> Das LCSA besteht aus drei differenten Methoden, dem LCA, LCC und SLCA, welche in Kombination eine interdisziplinäre Interpretation des Betrachtungsobjektes gewährleisten.<sup>38</sup> Das LCSA eignet sich für Prozesse, Produkte und neue Technologien. CPS können in letzteren Bereich eingeordnet werden (vgl. Kapitel 2). Das *Vorgehen* des Instruments orientiert sich an dem Verfahren des LCA. Es besteht aus der Festlegung des Untersuchungsrahmens und des Ziels, der Sachbilanz, der Wirkungsabschätzung und der Auswertung.<sup>39</sup> Folgende Abbildung zeigt einen beispielhaften, schematischen und integrierten Aufbau eines LCSA:<sup>40</sup>

<sup>33</sup>Vgl. WESTKÄMPER, E. u. a.: (Digitale Produktion), S.147.

<sup>34</sup>Vgl. GÖTZE, U.: (Kostenrechnung), S.299.

<sup>35</sup>Vgl. ebenda, S.300 ff.

<sup>36</sup>Vgl. KLOEPFFER, W.: (Sustainability), S.89; HALOG, A.; MANIK, Y.: (Framework), S.467; FINKBEINER, M. u. a.: (Life Cycle Sustainability Assessment), S.3311; KELLER, H.; RETTENMAIER, N.; REINHARDT, G. A.: (Practical Approach), S.1073.

<sup>37</sup>Vgl. KELLER, H.; RETTENMAIER, N.; REINHARDT, G. A.: (Practical Approach), S.1073.

<sup>38</sup>Vgl. MOLTESEN, A.; BJORN, A.: (Sustainability), S.43.

<sup>39</sup>Vgl. KELLER, H.; RETTENMAIER, N.; REINHARDT, G. A.: (Practical Approach), S.1075.

<sup>40</sup>Vgl. ebenda, S.1090.

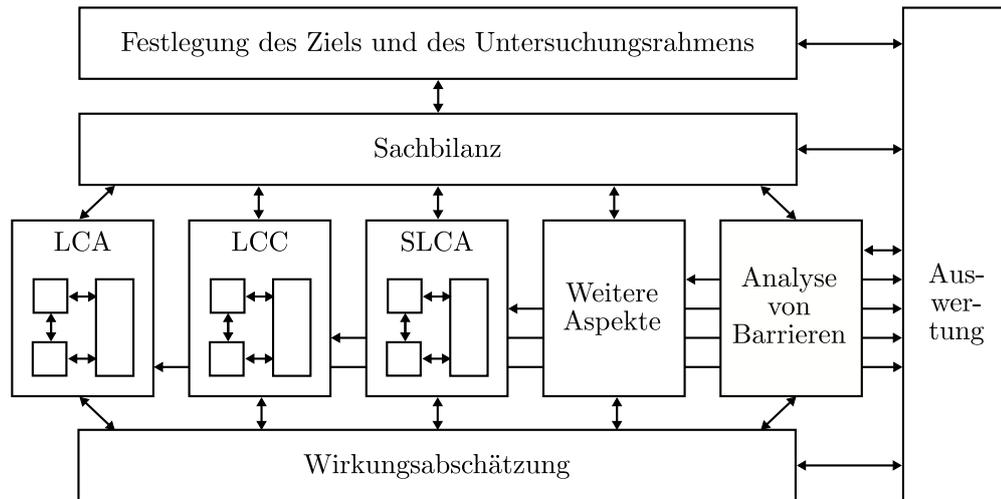


Abbildung 4.4: Aufbau und Ablauf des LCSA, leicht modifiziert und in Anlehnung an KELLER; RETTENMAIER; REINHARDT, S.144

In der ersten Phase werden die Grenzen der Untersuchung und das Betrachtungsobjekt (hier: CPS) festgelegt. Die Sachbilanz beinhaltet die Sammlung, Beschreibung und Berechnung der ökologischen, sozialen und ökonomischen Daten. Diese Phase wird in dem LCSA in einen ökonomischen (LCC), ökologischen (LCA) und sozialen (SLCA) Part untergliedert. Der Ablauf dieser Subsysteme verläuft adäquat zum Vorgehen der gesamten LCSA. Das LCA, zu deutsch Ökobilanz, beabsichtigt eine umweltbezogene Wirkungsabschätzung und -auswertung.<sup>41</sup> Dazu werden Daten relevanter Input- und Outputflüsse, bspw. Informationen zur Abgabe von Emissionen in die Luft, des CPS gesammelt, berechnet und anschließend in Wirkungskategorien eingeordnet.<sup>42</sup> Das LCC, zu deutsch Lebenszyklusrechnung, verfolgt eine zahlungsbezogene<sup>43</sup> Beurteilung.<sup>44</sup> Es werden sämtliche Zahlungen über den gesamten Lebenszyklus hinweg prognostiziert, gesammelt und in das KW-Modell überführt. Folglich gelten die Ausführungen der beschriebenen KW-Methode ebenfalls für das LCC und LCSA. Der berechnete Barwert kann anschließend dazu genutzt werden, die zielführendere Investitionsalternative auszuwählen und die Lebenszykluszahlungen strategisch positiv zu beeinflussen. Als optimal wird die Strategie angesehen, bei der Anfangs- und Folgezahlungen gleichermaßen gesenkt werden.<sup>45</sup> Ergänzend können Annuitätenmethode und Sensitivitätsanalysen angewandt werden, bei denen kritische Werte bzw. Schwellen zur Realisierung ermittelt werden.<sup>46</sup> Zu erwarten ist, dass auf Grund der Neuartigkeit von CPS eine herausfordernde Unsicherheit, in Bezug auf Art und Höhe von Folgezahlungen, v.a. in der Anfangsphase des Lebenszyklus

<sup>41</sup>Vgl. DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN): (DIN EN ISO 14040), S.14.

<sup>42</sup>Vgl. ebenda, S.27.

<sup>43</sup>Anmerkung: Es wird angenommen, dass Zahlungszeitpunkte für die Bewertung wichtig sind, sodass eine Betrachtung von Kosten und Erlösen ausgeschlossen wird.

<sup>44</sup>Vgl. GÖTZE, U.: (Kostenrechnung), S.299.

<sup>45</sup>Vgl. GÖTZE, U.: (Kostenrechnung), S.302.

<sup>46</sup>Vgl. ebenda, S.305.

besteht. Die SLCA, auch Sozialbilanz genannt, beschäftigt sich mit sozialer Aspekten des Betrachtungsobjektes.<sup>47</sup> Dazu gehören bspw. Informationen über die Akzeptanz in der und psychische Auswirkungen auf die Belegschaft im Unternehmen in Bezug auf das Untersuchungsobjekt.<sup>48</sup> Diese beispielhaften Aspekte können auf CPS übertragen werden, da diese konkrete Herausforderungen darstellen (vgl. Kapitel 2.4). Die SLCA befindet sich noch in der Entwicklungsphase. Schwierigkeiten bereitet v.a. die Datensammlung und -bewertung.<sup>49</sup> Ein möglicher Ansatz zur Operationalisierung besteht in der Anwendung eines Stakeholderdialogs, bei dem Befindlichkeiten sämtlicher beeinflussten Personen des Objektes erfragt und systematisch aufbereitet werden.<sup>50</sup> Neben den drei Subinstrumenten empfehlen KELLER; RETTENMAIER; REINHARDT eine Analyse von Barrieren des Objekts und die Nennung weiterer relevanter, nachhaltiger Aspekte, die ansonsten keine Berücksichtigung finden.<sup>51</sup> Unter Barrieren werden bspw. unzureichende rechtliche Zusammenhänge oder Rohstoffengpässe in der Fertigung verstanden.<sup>52</sup> Sämtliche Informationen der Subsysteme fließen in die Wirkungsabschätzung ein (vgl. Abbildung 4.4), in der die zuvor aufbereiteten Informationen in Wirkungskategorien eingeordnet, ggf. gewichtet und anschließend mit anderen Alternativen verglichen werden.<sup>53</sup> Im letzten Schritt werden die Ergebnisse interpretiert und Entscheidungsempfehlungen, bspw. ob und in welches CPS investiert werden sollte, formuliert. Hinsichtlich der Erfüllung der *Bewertungskriterien* ergibt sich ein durchweg positives Resümee. Die Kriterien bezgl. CPS können nahezu vollumfänglich erfüllt werden. Lediglich die wertschöpfungsübergreifende Betrachtung bedarf weiterer Forschungsarbeit. Innerhalb der Kriterien aus der Thematik der Nachhaltigkeit bereitet die Operationalisierung von sozialen Aspekten Schwierigkeiten. Entsprechende Ansätze sollten demnach (weiter)entwickelt werden. Als *Fazit* festzuhalten ist, dass technische Systeme der I4.0, darunter auch CPS, durch ihre Ansammlung von Echtzeitdaten des Unternehmens zur Transparenz von Lebenszyklusdaten<sup>54</sup>, zur Reduzierung von Lebenszykluskosten<sup>55</sup> und zur Erhöhung von Nutzen und Leistung über den gesamten Lebenszyklus bei Erweiterung einer bestehenden Produktionsanlage<sup>56</sup> beitragen. Einen zusammenfassenden Überblick gibt folgende Tabelle:

---

<sup>47</sup>Vgl. MOLTESEN, A.; BJORN, A.: (Sustainability), S.402.

<sup>48</sup>Vgl. ebenda, S.405.

<sup>49</sup>Vgl. ebenda, S.413.

<sup>50</sup>Vgl. COLSMAN, B.: (Nachhaltigkeitscontrolling), S.60.

<sup>51</sup>Vgl. KELLER, H.; RETTENMAIER, N.; REINHARDT, G. A.: (Practical Approach), S.1074.

<sup>52</sup>Vgl. ebenda.

<sup>53</sup>Vgl. ebenda, S.1077; DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN): (DIN EN ISO 14040), S.29.

<sup>54</sup>Vgl. WESTKÄMPER, E.: (Lebenszyklusbetrachtung), S.151.

<sup>55</sup>Vgl. GRAM, M.; GUGG, C.: (Einsatzmöglichkeiten), S.40.

<sup>56</sup>Vgl. ebenda.

Nr.	Untersuchung des LCSA	Ausprägung
Kriterien aus der Thematik CPS (vgl. Kapitel 2)		
1.	Berücksichtigung unterschiedlicher technischer Aufbauarten	●
2.	Berücksichtigung unterschiedlicher Nutzungsdauern von Komponenten	●
3.	Einbezug mehrerer Perioden	●
4.	Einbezug der Auswirkungen auf gesamte Wertschöpfungskette	◐
Kriterien aus der Thematik Nachhaltigkeit (vgl. Kapitel 3)		
5.	Beachtung ökonomischer Dimensionen	●
6.	Beachtung sozialer Dimensionen	●
7.	Beachtung ökologischer Dimensionen	◐
8.	Einbezug des gesamten Lebenszyklus des CPS und seiner Komponenten	●

Tabelle 4.7: Ausprägungen der Kriterien für das LCSA, eigene Tabelle

Neben den ausgewählten Instrumenten des Controllings existiert ein speziell entwickeltes und zukunftsorientiertes Verfahren für I4.0-Technologien, welches folgend auf seine Eignung für CPS untersucht wird. Es handelt sich um die **prozessorientierte Potenzialanalyse**.<sup>57</sup> Ziel dieses Ansatzes ist es, eine Bewertung und eine darauf aufbauende Auswahl von geeigneten I4.0-Technologien, denen CPS angehören, vorzunehmen. Das *Vorgehen* gliedert sich in drei Hauptschritte. Zuerst wird eine Prozessanalyse durchgeführt, um den Ist-Zustand der Wertschöpfung aufzunehmen und eventuelle Verbesserungspotenziale aufzufinden. Die Autoren empfehlen die Anwendung einer Wertstromanalyse, in der Material- und Informationsflüsse, Produktionsprozesse sowie dazugehörige Werte, wie bspw. Rüst- und Bearbeitungszeiten eines Prozesses, dokumentiert werden. Im zweiten Schritt erfolgt die eigentliche Bewertung von I4.0-Technologien, die anhand ihres Nutzens - bezogen auf die zuvor festgestellten Prozesse - beurteilt werden. Ein Nutzen entsteht für das Unternehmen dann, wenn Prozessverbesserungen eintreten oder -schwachstellen durch die Integration der Technologien eliminiert oder vermindert werden.<sup>58</sup> Die Betrachtungsobjekte beziehen sich auf Maschine, Mensch, Methode, Milieu und Material. Eine Vielzahl verschiedener Technologien, sowohl aus der I4.0 als auch anderen industriellen Vorstufen, werden anschließend hinsichtlich Ursache, Wirkung und Lösung miteinander verglichen.<sup>59</sup> Im dritten Schritt erfolgt die Potenzialanalyse, bei der geeignete I4.0-Technologien für den Betrieb ausgewählt werden. Dazu wird die zuvor vorgestellte Nutzwertanalyse als Instrument genutzt. Die fünf Betrachtungsobjekte (Maschine, Mensch, Methode, Milieu und Material) werden in Bezug auf Qualität, Kosten und Zeit, welche zuvor gewichtet werden, bewertet. Ebenso werden Verbesserungspotenziale aus dem zweiten Schritt hinsichtlich ihres Nutzwertes auf einer Skala von gering bis hoch beurteilt. Dieses Vorgehen wird für alle betrachteten Technologien

<sup>57</sup>Vgl. DOMBROWSKI, U. u. a.: (Potenzialanalyse), S.107-111.

<sup>58</sup>Vgl. DOMBROWSKI, U. u. a.: (Potenzialanalyse), S.108.

<sup>59</sup>Vgl. ebenda, S.109.

durchgeführt. Daraus ergibt sich ein Gesamtnutzen einer I4.0-Technologie. Neben diesem Wert wird zuletzt eine Bewertung der Gesamtmachbarkeit durchgeführt. Diese ermittelt sich aus dem dispositiven Aufwand (u.a. Aufwand für Um- und Neuplanung, Qualifizierungen) und dem elementaren Aufwand (Investitions- und Betriebskosten). Adäquat zum Gesamtnutzen wird ebenfalls die Machbarkeit anhand einer Skala von gering bis hoch eingeschätzt. Anschließend wird die Gesamtmachbarkeit einer I4.0-Technologie im Vergleich zu anderen Einsatzmöglichkeiten ermittelt. Gesamtnutzen und -machbarkeit jeder Technologie werden abschließend in einer Portfolio-Matrix zusammengeführt und positioniert (vgl. Abbildung 4.5). Daraus ergeben sich vier verschiedene Handlungsempfehlungen für den Einsatz der Technologie:

- Quick Wins: Empfehlung zur Integration des CPS
- Aussortieren: Empfehlung zur Vernachlässigung des CPS
- Vereinfachen: Umsetzung der Technologie ist erschwert und sollte überdacht werden
- Kombinieren: Empfehlung zur Nutzenerhöhung durch Verbund mehrerer CPS



Abbildung 4.5: Das Technologieauswahl-Portfolio und seine Ausprägungen, modifiziert und in Anlehnung an DOMBROWSKI u. a., S.3

Die spezifischen *Kriterien* von CPS werden in diesem Verfahren unzulänglich behandelt, obwohl dieser Ansatz speziell für I4.0-Technologien entwickelt wurde. Es werden keine unterschiedlichen Aufbauarten, Nutzungsdauern der Komponenten und mehrere Perioden berücksichtigt. Lediglich werden Verbesserungspotenziale in der Wertschöpfung aufgedeckt, eine Gesamtbetrachtung findet allerdings nicht statt. Die soziale Dimension wird im zweiten Verfahrensschritt hinsichtlich des Betrachtungsobjektes Mensch berücksichtigt. Offen bleibt, inwieweit die ökologische Dimension im Objekt Milieu und das ökonomische Segment generell beachtet wird. Ein Lebenszyklusbezug findet nicht statt.

Nr.	Untersuchung der prozessorientierten Potenzialanalyse	Ausprägung
Kriterien aus der Thematik CPS (vgl. Kapitel 2)		
1.	Berücksichtigung unterschiedlicher technischer Aufbauarten	○
2.	Berücksichtigung unterschiedlicher Nutzungsdauern von Komponenten	○
3.	Einbezug mehrerer Perioden	○
4.	Einbezug der Auswirkungen auf gesamte Wertschöpfungskette	◐
Kriterien aus der Thematik Nachhaltigkeit (vgl. Kapitel 3)		
5.	Beachtung ökonomischer Dimensionen	○
6.	Beachtung sozialer Dimensionen	●
7.	Beachtung ökologischer Dimensionen	◐
8.	Einbezug des gesamten Lebenszyklus des CPS und seiner Komponenten	○

Tabelle 4.8: Ausprägungen der Kriterien für die prozessorientierte Potenzialanalyse, eigene Tabelle

Als *Fazit* ist festzuhalten, dass dieses Instrument sehr der Nutzwertanalyse ähnelt. Jedoch wird keine konkrete Zielhierarchie erstellt, die die Operationalisierung einzelner Dimensionen konkret darstellt. Es ist empfehlenswert, das Instrument weiter auszubauen, sodass die CPS-Thematik stärker integrierbar ist. Dennoch liegt mit diesem Vorgehen ein umfangreiches, strukturiertes und prozessorientiertes Verfahren vor, welches bereits in der Praxis getestet wurde.

### 4.5.3 Untersuchung vergangenheitsorientierter Bewertungsansätze

Der Tabelle 4.3 folgend, wird zunächst die **Prozesskostenrechnung** betrachtet. Das *Ziel* dieses Instruments ist die verursachungsgerechte Zurechnung der im Unternehmen anfallenden Gemeinkosten auf die Produkte.<sup>60</sup> Dazu werden die ablaufenden Prozesse genauer inspiziert. In Bezug auf CPS wird folglich betrachtet, inwieweit deren Einsatz zu Veränderungen in der Prozesskostenrechnung führt. Es wird von der Produktion eines Produktes, bei der CPS mitwirken, ausgegangen. In der Literatur bestehen verschiedene Ansätze zur Durchführung einer Prozesskostenrechnung.<sup>61</sup> In der vorliegenden Arbeit wird das Activity-Based-Costing (ABC) untersucht, da es neben indirekten ebenfalls direkte Bereiche, wie bspw. die Fertigung, des Unternehmens einbezieht.<sup>62</sup> Das *Vorgehen* umfasst folgende Schritte:<sup>63</sup>

1. Abgrenzung und Einordnung der zu beurteilenden Prozesse
2. Bildung und Zuordnung von Kostenpools
3. Verrechnung der Kostenpools auf Produkte mittels Prozessbezugsgrößen

<sup>60</sup>Vgl. GÖTZE, U.: (Kostenrechnung), S.217.

<sup>61</sup>Anmerkung: Ein weiterer Ansatz ist das Konzept von HORVÁTH; MAYER, vgl. HORVÁTH, P.; MAYER, R.: (Prozesskostenrechnung), Vgl. und GÖTZE, U.: (Kostenrechnung), S.218.

<sup>62</sup>Vgl. SCHWEITZER, M. u. a.: (Systeme), S.378.

<sup>63</sup>Vgl. ebenda, S.378 ff.

#### 4. Berechnung der gesamten Prozesskosten

Zunächst werden die zu beurteilenden Prozesse abgegrenzt und in eine der vier Hierarchieebenen eingeordnet (1.).<sup>64</sup> Es wird in stück-, produkt- und losgrößen- und in unternehmensbezogene Prozesse unterschieden. Anschließend werden Kostenpools (2.), welche sämtliche prozessbezogene anfallende Kosten beinhalten, für jeden Prozess separat gebildet.<sup>65</sup> Innerhalb dieser Kostenpools ist in Bezug auf die Implementierung von CPS zu erwarten und hervorzuheben, dass Komplexitätskosten in Höhe von 60 bis 70 Prozent gesenkt werden.<sup>66</sup> Darunter sind Kosten zu verstehen, die bei Entwicklung, Produktion, Verwaltung und Verkauf einer Vielzahl individueller Produkte - wie sie in der I4.0 gefordert sind (vgl. Kapitel 2) - einhergehen.<sup>67</sup> Im ABC wird auf die Zurechnung von Leerkosten und Forschungs- und Entwicklungskosten verzichtet.<sup>68</sup> Darüber hinaus ist vorstellbar, dass Kosten für Verfahrenstechnik und Konstruktionsänderungen durch den Einsatz von cyber-physischen Fertigungssystemen abnehmen. Erstens können CPS so programmiert werden, dass sie vielfältige Fertigungsverfahren lernen und in Folge keine unterschiedlichen Maschinen mehr benötigt werden. Des Weiteren ist vorstellbar, dass CPS Konstruktionsänderungen selbstständig entwickeln und anschließend durchführen. Diese Überlegungen betreffen produktbezogene Prozesse. Zu den Kosten der unternehmensbezogenen Prozesse gehören u.a. Heizkosten der Fabrikumgebung. Diese können durch den energieeffizienteren Einsatz von CPS gesenkt werden. Des Weiteren ist anzuführen, dass eine Erweiterung der unternehmensbezogenen Kosten in Bezug auf die Thematik der Nachhaltigkeit sinnvoll erscheint. Als Beispiel dafür gelten Kosten für Umweltschutz, die zur Sicherung der unternehmerischen Existenz offensichtlich anfallen. Die erläuterten Überlegungen stellen Vermutungen dar, die allerdings aufgrund des fehlenden langfristigen Einsatzes von CPS und der damit einhergehenden unzulänglichen Datenansammlung nicht gesichert belegt werden können. Nach der zweiten Phase folgt die Verrechnung der Kostenpools auf die Produkte mittels Prozessbezugsgrößen (3.). Letztere werden anhand von Kostentreiber ausgewählt. Dabei kann es sich bspw. im Bereich stückbezogener Prozesse um Fertigungsstunden handeln, welche in Folge automatisierter Verfahren durch CPS weniger hoch ausfallen könnten. Die Kostenträgerkosten ergeben sich schlussendlich aus der Summe der Prozesskosten jeder Ebene. In Hinblick auf die *Erfüllung der Kriterien* ist vorstellbar, dass unterschiedliche Aufbauarten von CPS in verschiedenen Fertigungsprozessen berücksichtigt werden, da diese bspw. differente Maschinen- und Arbeitszeiten ausweisen. Die Kriterien der Unterscheidung der Nutzungsdauern von CPS und Komponenten und der Einbezug mehrerer Perioden werden nicht berücksichtigt. Weiterhin ist vorstellbar, die Prozessbetrachtung auf wert-

---

<sup>64</sup>Vgl. COOPER, R.: (Costing), S.277 f.

<sup>65</sup>Vgl. SCHWEITZER, M. u. a.: (Systeme), S.378.

<sup>66</sup>Vgl. BAUERNHANSL, T.: (Weg), S.21.

<sup>67</sup>Anmerkung: Weitere Prognosen zu unterschiedlichen Kosteneinsparungen sind Tabelle A.1 im Anhang zu entnehmen.

<sup>68</sup>Vgl. SCHWEITZER, M. u. a.: (Systeme), S.379.

schöpfungsübergreifende Abläufe auszuweiten. Eventuell geeignete Ansätze dazu lassen sich vereinzelt in der Literatur auffinden.<sup>69</sup> Ökologische und soziale Aspekte können in Form von Prozessbezugsgrößen teilweise berücksichtigt werden, da sie anschließend in monetäre Größen umgewandelt werden. Die ökologische und soziale Dimensionen werden demzufolge in der Prozesskostenrechnung unzulänglich beachtet. Die ökonomische Dimension hingegen ist durch monetäre Größen präsent. Ein allumfassender Lebenszyklusbezug findet nicht statt. Als *Fazit* ist festzuhalten, dass CPS prozess- und kostenverändernd wirken können. Weiterhin ist jedoch festzustellen, dass mit diesem Instrument CPS nicht direkt beurteilt werden können, sondern nur die Prozesse, in denen sie bei Erstellung eines Produktes mitwirken. Denkbar ist, die Prozesskostenrechnung auch aus Herstellersicht anzuwenden, indem CPS als Produkt geführt werden.

Nr.	Untersuchung der Prozesskostenrechnung	Ausprägung
Kriterien aus der Thematik CPS (vgl. Kapitel 2)		
1.	Berücksichtigung unterschiedlicher technischer Aufbauarten	●
2.	Berücksichtigung unterschiedlicher Nutzungsdauern von Komponenten	○
3.	Einbezug mehrerer Perioden	○
4.	Einbezug der Auswirkungen auf gesamte Wertschöpfungskette	●
Kriterien aus der Thematik Nachhaltigkeit (vgl. Kapitel 3)		
5.	Beachtung ökonomischer Dimensionen	●
6.	Beachtung sozialer Dimensionen	◐
7.	Beachtung ökologischer Dimensionen	◐
8.	Einbezug des gesamten Lebenszyklus des CPS und seiner Komponenten	○

Tabelle 4.9: Ausprägungen der Kriterien für die Prozesskostenrechnung, eigene Tabelle

Zuletzt wird der **Ansatz zur Komplexitätsbewertung von CPS**, entwickelt durch das Kooperationsnetzwerk Moderne Produktion (KMP), vorgestellt. BRINZER; BANERJEE gehen davon aus, dass CPS erhebliche Potenziale für Unternehmen zum Umgang mit Wettbewerbsfähigkeit und zunehmender Produktvielfalt bieten. Jedoch tragen sie ebenfalls zur Erhöhung ökonomischer, ökologischer und sozialer Risiken bei. Besonders hervorzuheben ist dabei die steigende Systemkomplexität bei innerbetrieblicher Integration von CPS. Aus diesem Grund entwickelten BRINZER; BANERJEE den „KMP-Ansatz zur Komplexitätsmessung“<sup>70</sup> mit der *Zielstellung*, die Komplexität von CPS wertschöpfungsübergreifend zu messen und zu bewerten.<sup>71</sup> Im Folgenden wird das *Vorgehen* kurz skizziert. Zuerst wird die gesamte Systemkomplexität betrachtet. Darunter wird das Zusammenspiel und die daraus resultierenden Auswirkungen von vier Dimensionen verstanden:<sup>72</sup>

<sup>69</sup>Vgl. SEURING, S.: (Supply Chain Costing), S.24 ff.

<sup>70</sup>BRINZER, B.; BANERJEE, A.: (Komplexitätsbewertung), S.343.

<sup>71</sup>Vgl. ebenda, S.343-345.

<sup>72</sup>Vgl. ebenda, S.343.

- Vielfalt: Anzahl der Prozess- und Produktvarianten
- Vernetzung: Intensität und Anzahl der Beziehungen zwischen smarten Objekten
- Dynamik: Zeitliche Veränderung der Beziehungen
- Unsicherheit: Betrachtung unbekannter Einflüsse

Die gesamte Komplexität wird anschließend in eine objektive, quantifizierbare und in eine subjektive, qualitative Komplexität zerlegt. Erste Ausprägung wird mittels eines Kennzahlenkataloges ermittelt. Dieser beinhaltet neben standardisierten Leistungskennzahlen, wie bspw. die Gesamtanlageneffektivität, auch soziale Faktoren, wie bspw. Ausprägungen psychischer Belastungen der Mitarbeiter. Letztere werden über Fragebögen ermittelt. Im Anschluss ergibt sich eine „wahrgenommene Komplexität“<sup>73</sup>, die objektive und subjektive Fakten beinhaltet. Parallel dazu werden diese Erkenntnisse genutzt, um Komplexitätstreiber und -ursachen zu identifizieren und frühzeitig mit geeigneten Maßnahmen gegenzusteuern. Die Nachteile dieses Verfahren liegen v.a. in dem bisher unzulänglich bearbeiteten Kennzahlenkatalog, der gegenwärtig mit Industriepartnern konfiguriert wird. Des Weiteren weisen die Autoren daraufhin, dass die Komplexität von CPS erst umfänglich bewertet werden kann, wenn eine aktivere Beteiligung des Managements stattfindet. Weiterhin gehen sie davon aus, dass Unternehmen perspektivisch mit der Komplexität von CPS konfrontiert werden und anschließend gezwungen sind geeignete Instrumente zur Bewertung von CPS einzusetzen.<sup>74</sup>

Bei der Überprüfung auf *Eignung mittels der Kriterien* fällt auf, dass einige CPS-spezifische Anforderungen (1. - 3.) nicht gewährleistet werden. Im Artikel wird lediglich angerissen, dass Komplexität ebenfalls auf wertschöpfungsübergreifende Vorgänge bezogen werden soll. Deren genaue Ausgestaltung bleibt jedoch offen. Hingegen werden Kriterien der Nachhaltigkeit tiefgründiger berücksichtigt. So werden die ökonomische und soziale Dimension durch geeignete Kennzahlen widerspiegelt. Die explizite Beachtung der ökologischen Dimension, z.B. in Form von Kennzahlen, findet im Artikel nicht statt. Jedoch weisen die Autoren daraufhin, dass Ökologie mindestens einen Bestandteil ihrer Überlegungen darstellt. Eine umfassende lebenszyklusbezogene Bewertung findet ebenfalls nicht statt. Als *Fazit* wird festgehalten, dass sich der KMP-Ansatz noch in der Entwicklungsphase befindet und einzelne Komponenten gegenwärtig (noch) nicht finalisiert sind. Vor allem Besonderheiten von CPS, wie bspw. technische Aufbauarten oder Nutzungsdauern, werden in diesem Vorgehen unzulänglich berücksichtigt. Jedoch ist darauf hinzuweisen, dass das Vorgehensmodell zur Komplexitätsbewertung keinesfalls unbrauchbar ist. Lediglich besteht Forschungsbedarf in der Symbiose aus CPS, Komplexität und deren konkreter Operationalisierung.

---

<sup>73</sup>BRINZER, B.; BANERJEE, A.: (Komplexitätsbewertung), S.343.

<sup>74</sup>Vgl. ebenda, S.341 ff.

Nr.	Untersuchung des KMP-Ansatzes zur Komplexitätbewertung von CPS	Ausprägung
Kriterien aus der Thematik CPS (vgl. Kapitel 2)		
1.	Berücksichtigung unterschiedlicher technischer Aufbauarten	○
2.	Berücksichtigung unterschiedlicher Nutzungsdauern von Komponenten	○
3.	Einbezug mehrerer Perioden	○
4.	Einbezug der Auswirkungen auf gesamte Wertschöpfungskette	◐
Kriterien aus der Thematik Nachhaltigkeit (vgl. Kapitel 3)		
5.	Beachtung ökonomischer Dimensionen	●
6.	Beachtung sozialer Dimensionen	●
7.	Beachtung ökologischer Dimensionen	◐
8.	Einbezug des gesamten Lebenszyklus des CPS und seiner Komponenten	○

Tabelle 4.10: Ausprägungen der Kriterien für den KMP-Ansatz zur Komplexitätbewertung von CPS, eigene Tabelle

## 4.6 Auswertung und Fazit

Als Fazit kann gesagt werden, dass die ausgewählten Instrumente unterschiedliche Stärken und Schwächen aufweisen und somit folglich CPS auf differente Art und Weise bewerten können. Auffallend ist, dass bereits die allgemeinen Bewertungsanforderungen (vgl. Kapitel 4.2) nur unzulänglich eingehalten werden können. Zentrale Schwierigkeiten bereitet das Kriterium der zeitlichen und sachlichen Vollständigkeit. Vollständige und nachhaltige Einflussgrößen von CPS stehen als Basis für Bewertungsinstrumente unzureichend in der Literatur zur Verfügung. Die Begründung liegt in den wenigen Informationen und Wirkungsabschätzungen, die über CPS bekannt sind. Aus diesem Grund kann eine zeitliche Vollständigkeit ebenfalls nicht gewährleistet werden. Folgend wird auf die Ergebnisse der einzelnen Instrumente eingegangen, Tabelle 4.11 gibt einen abschließenden Überblick.<sup>75</sup>

<sup>75</sup>Anmerkung: Zur Übersichtlichkeit wurde auf die vollständige Ausschreibung der Kriterien verzichtet.

	Kriterien							
	Aufbauarten	Nutzung	Perioden	Auswirkungen	Ökonomie	Soziales	Ökologie	Lebenszyklus
Kostenrechnung und -management								
Prozesskostenrechnung	●	○	○	●	●	◐	◐	○
TC	○	○	◐	○	●	○	○	◐
Investitionsmanagement								
KW-Methode	●	●	●	○	●	○	○	○
Nutzwertanalyse	◐	◐	○	○	◐	●	●	○
Lebenszyklusbezogene Instrumente								
LCSA	●	●	●	◐	●	●	◐	●
Spezielle Ansätze mit CPS-Thematik								
Prozessorientierte Potenzialanalyse	○	○	○	◐	○	●	◐	○
Ansatz zur Komplexitätsbewertung CPS	○	○	○	◐	●	●	◐	○

Tabelle 4.11: Übersicht der Kriterienausprägungen untersuchter Instrumente, eigene Tabelle

Zunächst folgt eine Auswertung für zukunftsorientierte Instrumente. Das TC eignet sich weniger gut für eine Bewertung aus Verwendersicht, da die für CPS anfallende Kosten einzig in den Gemeinkosten erfasst werden. Die KW-Methode deckt zwar lediglich die ökonomische Dimension ab, kann aber 75 Prozent der CPS-Kriterien erfüllen. Mit seinen Modellerweiterungen, bezogen auf Investitions- und Ersatzzeitpunktberechnungen, ist es ein sinnvolles Instrument, um monetärbasierte und zukunftsbezogene Entscheidungen in Bezug auf CPS vorzubereiten. Die Stärken der Nutzwertanalyse bestehen in der Berücksichtigung der sozialen und ökologischen Dimensionen, die hingegen in anderen Modellen eher weniger Beachtung finden. Die ökonomischen Auswirkungen werden durch dieses Instrument nicht einbezogen, sind jedoch zwingend für den langfristigen Fortbestand des Unternehmens nötig. Das LCSA ist ein umfassendes Instrument und kann sich zukünftig sehr gut für die Bewertung von CPS unter Einbezug der Nachhaltigkeit eignen. Gegenwärtig bestehen jedoch einige Unklarheiten, bspw. in Bezug auf die Operationalisierung von sozialen Aspekten, die für den reibungslosen Einsatz in der Praxis eliminiert werden müssen. Mit der prozessorientierten Potenzialanalyse lassen sich strategische Handlungsempfehlungen für CPS und deren Nutzenpotenziale ableiten. Obwohl dieses Instrument für I4.0-Technologien entwickelt wurde, können CPS-Kriterien nur unzureichend integriert werden. Die Untersuchung der vergangenheitsorientierten Instrumente liefert ein gemischtes Ergebnis. Die Prozesskostenrechnung (ABC-Ansatz) besitzt Schwierigkeiten die Kriterien von CPS zu erfüllen, da mit ihr lediglich die kostenprägten Auswirkungen von CPS in Prozessen berücksichtigt werden. Jedoch können auf diese Weise Kosteneinsparungen, impliziert durch CPS, konkret herausgestellt wer-

den. Enormes Potenzial besteht in der Reduktion von Komplexitätskosten. Diese greift der KMP-Ansatz auf. Diese Methodik ist thematisch sehr gut für CPS geeignet, da die Reduzierung der Komplexitätskosten der Schwerpunkt der Auswirkungen von CPS sind. Allerdings sind Vorgehen und Komponenten noch nicht ausgereift, sodass ein praxisnaher Einsatz gegenwärtig schwierig ist.

Mit der durchgeführten Untersuchung können zwei Vorgehen entwickelt werden, die Unternehmen erst zur Bewertung zukünftiger CPS-Investitionen und anschließend zur Bewertung im Betrieb bestehender CPS anwenden können. Ein möglicher erster Verfahrensablauf könnte wie folgt aussehen. Zunächst ist es empfehlenswert, eine Bewertung in Bezug auf Vorteilhaftigkeit eines CPS für das Unternehmen durchzuführen. Vorstellbar ist, die KW-Methode mit Ersatz- und Investitionszeitpunkten anzuwenden. Parallel dazu empfiehlt sich eine Nutzwertanalyse, um soziale und ökologische Fakten in die Zielstellung einzubeziehen. Bei erfolgreicher Integration von CPS in den Betrieb kann mittels einer Prozesskostenrechnung (hier: ABC-Ansatz) die kostenseitigen Auswirkungen rückwirkend analysiert werden. Da sich der KMP-Ansatz gegenwärtig noch in der Entwicklungsphase befindet, sollte auf bereits etablierte Methoden zurückgegriffen werden. Ein zweites mögliches Vorgehen kann die alleinige Durchführung von einem LCSA darstellen. Jedoch ist anzumerken, dass diese Methode bisher wenig in der Praxis angewandt wurde, sodass geringe betriebliche Erfahrungen in der Anwendung bestehen. Ungeachtet dessen erfüllt das LCSA nahezu sämtliche geforderten Kriterien und es ist zu erwarten, dass sich letzte Forschungslücken aufgrund hoher Präsenz der Thematiken zeitnah schließen werden. Eine anschließende Prozesskostenrechnung kann auch in diesem Vorgehen nachfolgend angewandt werden.

Ein weiterer Nutzen dieser Untersuchung besteht in der Überlegung, ob die untersuchten Instrumente die Chancen und Herausforderungen von CPS operationalisieren können. Dazu wird das IND (vgl. Kapitel 3.2) herangezogen. Abbildung 4.6 gibt einen Überblick über die Einordnung der ausgewählten Instrumente im IND. Die Eingliederung erfolgte anhand der Beachtung ökonomischer, ökologischer und sozialer Dimensionen aus den zuvor aufgestellten Kriterien jedes Instrumentes.

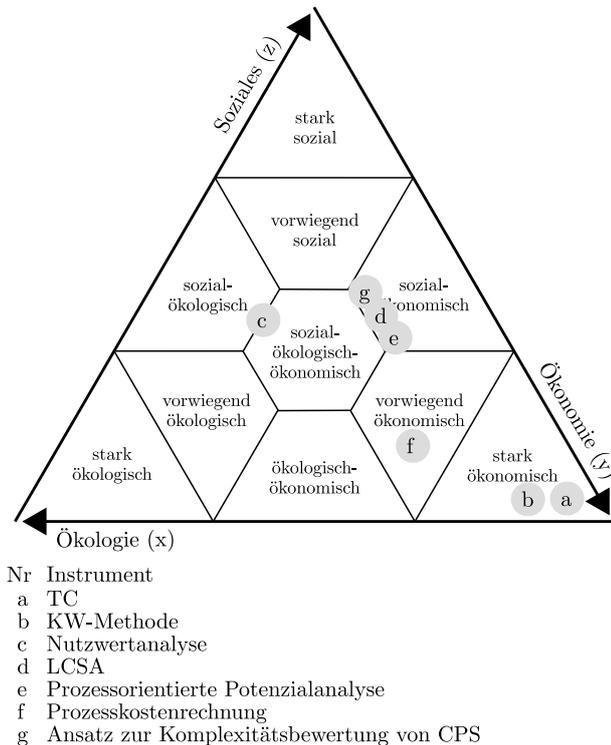


Abbildung 4.6: Visualisierung der vorgestellten Instrumente im IND, eigene Darstellung

Außerdem wird ein IND mit den erarbeiteten Potenzialen und Herausforderungen aus Kapitel 2.4 benötigt, welches in Abbildung 4.7 dargestellt wird.<sup>76</sup> Anschließend werden die zwei Grafiken (Abbildung 4.6 und 4.7) übereinander gelegt, wie Abbildung 4.8 demonstriert. Daraus lässt sich ableiten, inwiefern die Bewertungsinstrumente von CPS zur Operationalisierung der Herausforderungen und Chancen des Bewertungsobjekts beitragen. Diese Überlegungen könnten dazu beitragen, mithilfe der Bewertungsinstrumente eventuelle Wirkungsabschätzungen der Chancen und Risiken von CPS zu beurteilen. Auffallend ist, dass sich die untersuchten Bewertungsansätze im sozial-ökologisch-ökonomischen bis stark ökonomischen Bereich des IND ansiedeln. Schwierigkeiten bereitet demnach die Operationalisierung von stark ökologischen und sozialen Aspekten. Demgegenüber stehen Bewertungsinstrumente, die nahezu sämtliche Dimensionen umfassen (c,d,e und g). Diese besitzen lediglich kleinere Ungenauigkeiten im Bereich der ökonomischen (c) oder ökologischen (g,d,e) Dimension. Demnach können CPS mit diesen Methoden auf ihre Nachhaltigkeit überprüft werden. Die Chancen und Herausforderungen siedeln sich ebenfalls eher im rechten Bereich des IND an. Auffallend ausgeprägt ist der stark soziale Bereich mit fünf Aspekten. Das sozial-ökologisch-ökonomische Feld beinhaltet drei Herausforderungen (3,9,8), die als äußerst komplex zu bewältigen gelten. Das stark ökologische Problem- und Potenzialfeld bleibt unbesetzt. In Kombination fällt auf, dass Instrumente und Herausforderungen sowie Potenziale nahezu die gleichen

<sup>76</sup>Eine verbale Einordnung der Potenziale und Herausforderungen wurde bereits in Kapitel 2.4 vorgenommen und wird hier lediglich visualisiert.

Bereiche betreffen. Lediglich das stark soziale und ökologisch-ökonomische Feld werden von den Methoden nicht umfasst. Fraglich ist, ob es darüber hinaus notwendig ist geeignete Bewertungsverfahren für diese Segmente zu entwickeln oder ob diese mit integrierenden, nachhaltigen Instrumenten ausreichend abgedeckt werden. Empfehlenswert ist, diese Entscheidung individuell im Unternehmen und von der Komplexität der vorliegenden Zielstellung abhängig zu machen. Es bleibt festzuhalten, dass prinzipiell geeignete Verfahren zur Bewertung von CPS unter Einbezug der Nachhaltigkeit vorliegen. Schwierigkeiten bereitet die Operationalisierung der sozialen Dimension. Des Weiteren ist anzumerken, dass spezielle Bewertungsmethoden für CPS gegenwärtig noch weiterentwickelt werden. Die aufgestellten Kriterien von CPS werden in keinem Instrument vollständig erfüllt, können jedoch in Kombination mehrerer Methoden berücksichtigt werden.

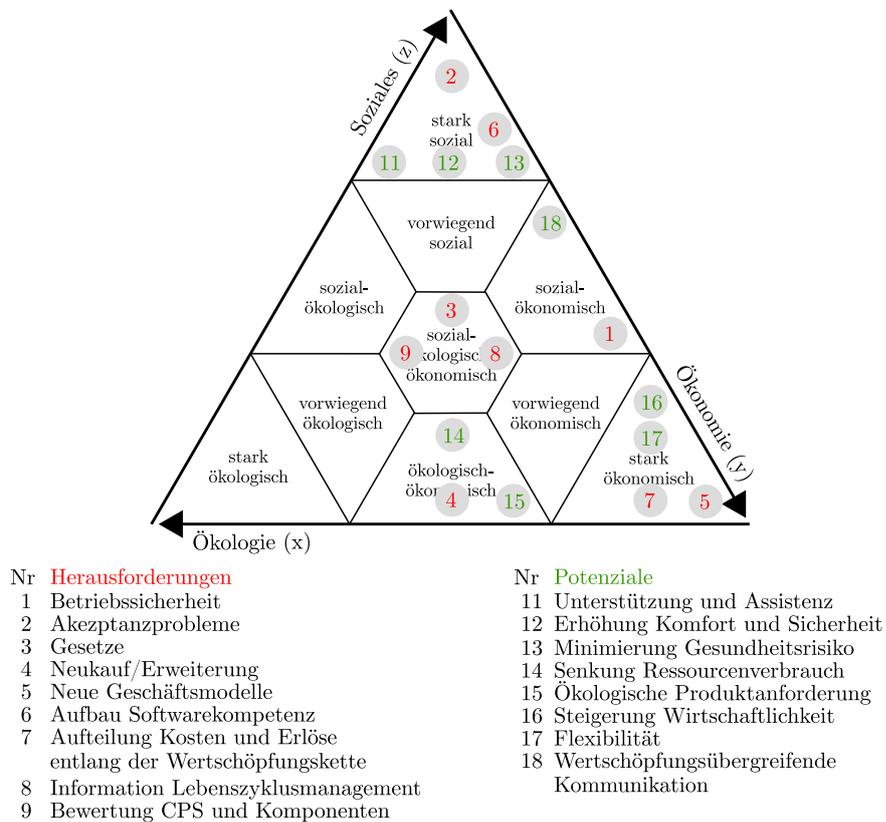


Abbildung 4.7: Visualisierung der Potenziale und Herausforderungen von CPS im IND, eigene Darstellung

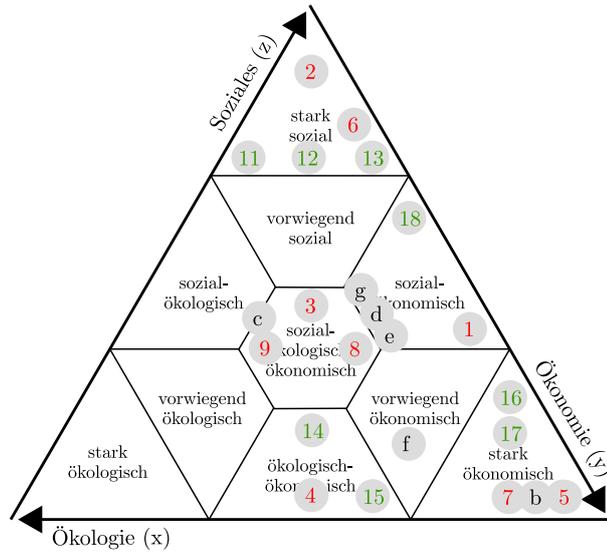


Abbildung 4.8: Visualisierung der Instrumente sowie Herausforderungen und Potenziale von CPS im IND, eigene Darstellung

## 5 Kritische Würdigung und Ausblick

Um aussagekräftige Bewertungsansätze zur Beurteilung von CPS unter Einbezug der Nachhaltigkeit zu untersuchen, wurde in Kapitel 2 geklärt, wie ein CPS definiert und charakterisiert ist. Auffallend ist, dass kein einheitliches Begriffsverständnis existiert. In der vorliegenden Arbeit wurde deklariert, dass ein CPS aus einem Verbund von physischen und eingebetteten Systemen besteht. Es wurde herausgestellt, dass zwei verschiedene Herangehensweisen bezgl. des Aufbaus von CPS üblich sind. Erstens können bestehende betriebliche Objekte durch Integration verschiedener Komponenten zum CPS erweitert werden. Zweitens ist es ebenfalls möglich, vollkommene CPS-Lösungen am Markt zu erwerben. Aus dieser Unterscheidung resultieren differente Nutzungsdauern der einzelnen Komponenten, die für Bewertungen entscheidend sind. Ebenfalls konnten Mindestbestandteile und -funktionen cyber-physischer Konstrukte identifiziert werden. Weiterhin ist festzuhalten, dass Potenziale stärker in der Literatur herausgestellt werden als Herausforderungen von CPS. Begründet wird dieser Umstand durch die noch in den Anfängen stehende Entwicklung von CPS und die dadurch fehlende Wirkungsabschätzungen. Da die Thematik der Nachhaltigkeit zunehmend Präsenz in Unternehmen erfährt, wurde diese in Kapitel 3 eruiert. Unter Nachhaltigkeit wird eine ökonomische, soziale und ökologische Sichtweise verstanden. Diese hat zum Ziel, den Fortbestand natürlicher Systeme zu wahren. Zahlreiche erläuterte nachhaltige Push- und Pull-Faktoren, die auf Betriebe einwirken, bestätigen den interdisziplinären Handlungsbedarf. Folglich werden Unternehmen damit konfrontiert, ihre Ablauf- und Aufbauorganisation nachhaltig zu gestalten, um den ökonomischen, ökologischen und sozialen Anforderungen langfristig gerecht zu werden. Diese tiefgreifenden Auswirkungen reichen bis in die Grundsubstanz, auch nachhaltiges Kapital genannt, des Unternehmens. Controllinginstrumente bieten die Möglichkeit, betriebliche, nachhaltige und aufgrund von Treibkräften notwendige Maßnahmen zu operationalisieren und zu messen. Eine Auswahl verschiedenartiger bewertender Ansätze der Kostenrechnung, des Kosten- und Investitionsmanagements sowie unternehmensstrategische und lebenszyklusbezogene Methodiken wurde vorgestellt. Zur Visualisierung verschiedener Untersuchungsobjekte unter Einbezug der Nachhaltigkeit eignet sich das IND mit drei gleichschenkligen Seiten, die die Gleichgewichtung der Dimensionen widerspiegelt. Gemeinsamer Konsens herrscht in der Literatur darüber, dass Unternehmen langfristig nur bestehen können, wenn sie Nachhaltigkeit in ihre Unternehmenssteuerung integrieren.

In Kapitel 4 wurden die Thematiken der Grundlagenkapitel zusammengeführt. Es folgte eine Untersuchung auf Eignung ausgewählter Bewertungsinstrumente für CPS unter Einbezug der Nachhaltigkeit durchgeführt. Dazu wurde ein eigenes Vorgehensmodell entwickelt und ausgewählte Instrumente mittels zuvor festgelegter Kriterien untersucht. Die Ergebnisse können von Unternehmen zur Investitionsentscheidung und/oder Kontrolle bestehender CPS herangezogen werden. Dazu sind zwei Abläufe vorstellbar. Beim ersten Vorgehen wird die KW-Methode mit Ersatz- und Investitionszeitpunkten angewandt.

Parallel dazu ist eine Nutzwertanalyse mit Sensitivitäts- und Risikoanalysen denkbar, die ökologische und soziale Sichtweisen stärker involviert. Eine anschließende vergangenheitsorientierte Prozesskostenrechnung rundet das erste Verfahren ab. Das zweite Vorgehen inkludiert das LCSA, da dieses Instrument nahezu sämtliche Anforderungen und Kriterien selbstständig erfüllt. Eine im Anschluss durchgeführte Prozesskostenrechnung ist ebenfalls denkbar. Schwierigkeiten bereitet die Operationalisierung der sozialen Dimension, da sie zu großen Teilen subjektiv ausgestaltet wird. Weiterhin ist mit dem Vorgehensmodell eine Gegenüberstellung und visuelle Darstellung der Problem- und Potenzialfelder und Bewertungsinstrumenten von CPS unter Einbezug der Nachhaltigkeit möglich. Es stellte sich heraus, dass die ausgewählten Instrumente sich annähernd den gleichen nachhaltigen Bereichen widmen, wie die der Herausforderungen und Chancen. Dieses Ergebnis lässt die Vermutung zu, dass sich diese Bewertungsansätze zur Operationalisierung der Probleme und Potenziale von cyber-physischen Konstrukten nutzen lassen.

Forschungsbedarf besteht in der Erschaffung eines einheitlichen Begriffsverständnisses von CPS, welches für interdisziplinäre Zusammenarbeiten benötigt wird. In der vorliegenden Arbeit wurde ersichtlich, dass die Notwendigkeit besteht, speziell für CPS entwickelte Instrumente praxistauglich weiterzuentwickeln, sodass Unsicherheiten in Bezug auf Integration neuartiger Systeme schwinden. Weiterhin besteht für die soziale Dimension enormer Forschungsbedarf. Ihre Operationalisierung bereitet innerhalb der Instrumente am meisten Schwierigkeiten. Aus diesem Grund ist die sachliche Vollständigkeit als Bewertungsanforderung gegenwärtig nicht gegeben. Parallel dazu ist das soziale Segment der am stärksten ausgeprägte Bereich hinsichtlich Herausforderungen von CPS. Es kann folglich festgehalten werden, dass der Bedarf an sozialen Maßnahmen gegeben ist. Des Weiteren besteht aufgrund der noch in den Anfängen stehenden Technologie eine Datenlücke, d.h. es existieren bislang nur wenige Erfahrungen bezgl. der Auswirkungen von CPS, die zur Bewertung genutzt werden können. Die zeitliche Vollständigkeit der Daten ist somit ebenfalls nicht gegeben.

In der vorliegenden Arbeit wurde Technik als Enabler deklariert und bewusst nicht als Dimension betrachtet. Es ist jedoch vorstellbar, dass die z.T. sehr technischen Eigenschaften von CPS nur mit erhöhtem Aufwand in Controllinginstrumente integriert werden können. Aus diesem Grund ist eine stark interdisziplinäre Forschung unerlässlich, sodass das IND um eine technische Dimension ergänzt werden könnte. Das IND spannt sich in Folge eines weiteren Segments zu einer integrierenden Nachhaltigkeitspyramide auf. Abbildung 5.1 zeigt eine mögliche Visualisierung.

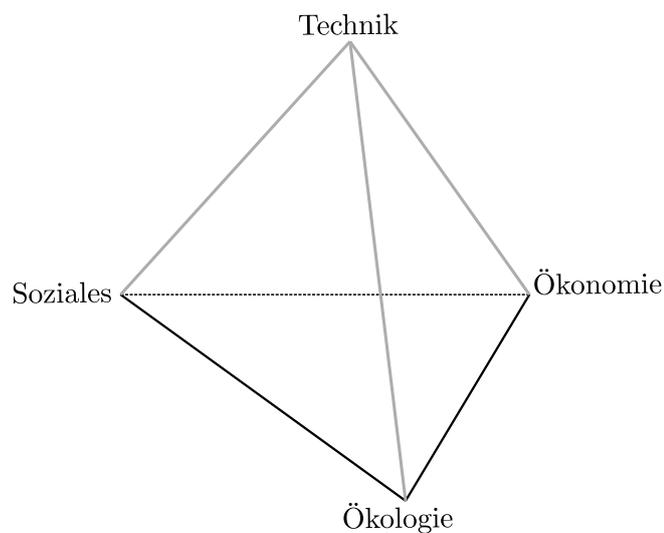


Abbildung 5.1: Die integrierende Nachhaltigkeitspyramide mit vier Dimensionen, eigene Darstellung

Es entstehen vielfältigere Vergleichsmöglichkeiten, aus denen sich wiederum neue Zusammenhänge entwickeln lassen. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass der Bedarf an Bewertungsansätzen von CPS in Kombination mit Nachhaltigkeit gegenwärtig besteht und mit existenten Methoden bewältigt werden kann.

## Anhang

Kostenart	Effekte	Kosteneinsparung in Prozent
Bestandskosten	Reduzierung der Sicherheitsbestände	30 bis 40
Fertigungskosten	Verbesserung der Flexibilität	10 bis 20
Logistikkosten	Erhöhung des Automatisierungsgrads	10 bis 20
Komplexitätskosten	Erweiterung der Leitungsspannen	60 bis 70
Qualitätskosten	Vermeidung Regelprüfungsredundanzen	10 bis 20
Instandhaltungskosten	Dynamische Priorisierung	20 bis 30

Tabelle A.1: Potenziale der Kosteneinsparungen durch CPS, modifiziert und in Anlehnung an BAUERNHANSL, S.31.

	Zieldimension			Zielgröße		Rechenmethode		Zielobjekt					Lebenszyklusbezug		Zeitorientierung			
	ökologisch	ökonomisch	sozial	nicht-monetär	monetär	statisch	dynamisch	UN-Strategie	Produkt	Prozess	Weitere Ressourcen	Umweltschutz	Beziehungen	ausgewählte Phasen	kompletter Zyklus	Vergangenheit	Zukunft	
<b>Kostenrechnung und -management</b>																		
<u>Kostenrechnung</u>																		
Prozesskostenrechnung	x	x	x		x			x	x	(x)							x	
Materialflusskostenrechnung	x	x		x	x				x			x					x	
Ressourcenkostenrechnung	x	x		x	x				x			x					x	
Umweltkostenrechnung	x	x			x			x	x	x		x					x	
<u>Kostenmanagement</u>																		
Target Costing		x			x				x					x			x	
Benchmarking	x	x	x	x	x			x	(x)	(x)		(x)				x		
<b>Investitionsmanagement</b>																		
<u>Vorteilhaftigkeitsentscheidung mit einer Zielgröße</u>																		
Kostenvergleichsrechnung		x			x	x			x	x	x						x	
Gewinnvergleichsrechnung		x			x	x			x	x	x						x	
Rentabilitätsrechnung		x			x	x			x	x	x						x	
Amortisationsrechnung		x			x	x			x	x	x						x	
KW-Methode		x			x		x	x	x	x	x	x		x			x	
Annuitätenmethode		x			x		x	x	x	x	x	x					x	
dynamische Amortisationsrechnung		x						x	x	x	x	x					x	
Methode des internen Zinsfußes		x			x		x	x	x	x	x	x					x	
<u>Vorteilhaftigkeitsentscheidung mit mehreren Zielgrößen</u>																		
Nutzwertanalyse	x	(x)	x	x		x			x	x	x						x	
<b>Instrumente der Unternehmensstrategie</b>																		
Sustainability Balanced Scorecard	x	x	x	x	x	x		x	(x)	(x)	(x)	(x)					x	x
Sustainable Value	x	x	x		x	x		x									x	
Wesentlichkeitsanalyse	x	x	x		x			x									x	
Nachhaltigkeitschecklisten	x	x	x	x				x	(x)	x	x	x	x		x	x		
<b>Lebenszyklusbezogene Instrumente</b>																		
Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA)	x	x	x				x		x	x	x				x	x	x	
Ökobilanz (LCA)	x			x	x				x	x	x				x	x	x	
Sozialbilanz (SLCA)			x	x	x				x	x	x				x	x	x	
Life Cycle Costing (LCC)		x			x		x		x	x	x		x		x	x	x	

Abbildung A.1: Klassifizierung von Controllinginstrumenten, eigene Darstellung

# Literaturverzeichnis

- ABELE, E.; REINHART, G.: (Zukunft) der Produktion. München, 2011.
- AMBERG, M.; BODENDORF, F.; MÖSLEIN, K. M.: Wertschöpfungsorientierte (Wirtschaftsinformatik). Berlin u.a., 2011.
- ARTS, B.: Nachhaltige Entwicklung - Eine begriffliche (Abgrenzung). In: *Peripherie: Zeitschrift für Politik und Ökonomie in der Dritten Welt* (1994), S. 6–27.
- BARBIER, E. B.: The Concept of Sustainable Economic (Development). In: *Environmental Conservation* (1987), S. 101–110.
- BARDT, H.: (Indikatoren) ökonomischer Nachhaltigkeit. Köln, 2011.
- BAUERNHANSL, T.: Die vierte industrielle Revolution - Der (Weg) in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Wiesbaden, 2014, S. 1–31.
- BECKER, J.: (Marketing-Konzeption): Grundlagen des ziel-strategischen und operativen Marketing-Managements. 11. Aufl., München, 2019.
- BERLIN, S.: Strategisches Kosten- und CO<sub>2</sub>-Management in der Produktentwicklung - ein (grüner Target Costing-Ansatz). In: *Nachhaltigkeitscontrolling: Konzepte, Instrumente und Fallbeispiele für die Umsetzung*. Freiburg u.a., 2012, S. 231–248.
- BETTENHAUSEN, K. D.; KOWALEWSKI, S.: Cyber-physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der (Automation). In: *VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik* (2013), S. 9–10.
- BLEYMÜLLER, J. u. a.: (Statistik) für Wirtschaftswissenschaftler. 17. Aufl., München, 2015.
- BONTRUP, H.-J.: Volkswirtschaftslehre: (Grundlagen) der Mikro- und Makroökonomie. 2. Aufl., München, 2004.
- BRINKSCHULTE, U.; UNGERER, T.: (Mikrocontroller) und Mikroprozessoren. 3. Aufl., Berlin, 2010.
- BRINZER, B.; BANERJEE, A.: (Komplexitätsbewertung) im Kontext cyber-physischer Systeme. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 112. Jg., Nr. 5, (2017), S. 341–345.
- BROY, M.: Cyber-physical Systems: (Innovation) durch softwareintensive eingebettete Systeme. Berlin u.a., 2010.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (BMWi): (Fortschrittsbericht): Industrie 4.0 gestalten. Berlin, 2019.
- BUNDESREGIERUNG DEUTSCHLAND: (Perspektiven) für Deutschland. In: *Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung* Nr. 343, (2002).
- BUNDESREGIERUNG DEUTSCHLAND: Gesetz zur Anpassung des Datenschutzrechts an die (Verordnung) (EU) 2016/679 und zur Umsetzung der Richtlinie (EU) 2016/680 (Datenschutz-Anpassungs- und Umsetzungsgesetz EU - DSAnpUG-EU). Teil I Nr. 44. Berlin, 2017.

- CARLOWITZ, H.-C. von: Sylvicultura (Oeconomica) Oder Haußwirthliche Nachricht und Naturmäßige Anweisung zur Wilden Baum-Zucht. 2. Aufl., Leipzig, 1732.
- COLSMAN, B.: (Nachhaltigkeitscontrolling): Strategien, Ziele, Umsetzung. 2. Aufl., Bad Homburg, 2016.
- COOPER, R.: Activity-Based-(Costing). In: *Kostenrechnungspraxis (34)* (1990), S. 210-220, 271-279, 345-351.
- CORSTEN, H.; ROTH, S.: Nachhaltigkeit: Unternehmerisches Handeln in globaler (Verantwortung). Bd. 73. Wiesbaden, 2012.
- DEUTSCH, N.; KRUGER, L.; MICHEL, T.: (Benchmarking) als Teil eines Energiecontrollings. In: *Nachhaltigkeitscontrolling - Konzepte, Instrumente und Fallbeispiele für die Umsetzung*. Freiburg u.a., 2012, S. 141-160.
- DEUTSCHER BUNDESTAG: Enquete-Kommission: Die Industriegesellschaft gestalten – Perspektiven für einen nachhaltigen (Umgang) mit Stoff-und Materialströmen. Bonn, 1994.
- DEUTSCHER BUNDESTAG: Enquete-Kommission: Konzept Nachhaltigkeit - vom (Leitbild) zur Umsetzung (Abschlussbericht). 4/98. Deutscher Bundestag, 1998.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN): (DIN EN ISO 14040): Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen. Berlin, 2009.
- DOMBROWSKI, U. u. a.: Prozessorientierte (Potenzialanalyse) von Industrie 4.0-Technologien: Zielorientiertes Auswahlverfahren. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 113. Jg., Nr. 3, (2018), S. 107-111.
- DRATH, R.: Technische (Grundlagen). In: *Industrie 4.0 im internationalen Kontext*. Bd. 4, Berlin u.a., 2017, S. 18-24.
- DROSSEL, W.-G. u. a.: Cyber-Physische (Systeme). In: *Digitalisierung*. München, 2018, S. 197-222.
- EMPACHER, C.; WEHLING, P.: Soziale Dimensionen der Nachhaltigkeit: Theoretische Grundlagen und (Indikatoren). 11. Frankfurt am Main, 2002.
- FESTINGER, L.: A Theory of Cognitive (Dissonance). 2. Aufl., Stanford, 1962.
- FIGGE, F.; HAHN, T.: (Sustainable Value) added: Ein neues Maß des Nachhaltigkeitsbeitrags von Unternehmen am Beispiel der Henkel KGaA. In: *Vierteljahrshefte zur Wirtschaftsforschung* 73. Jg., Nr.1, (2004), S. 126-141.
- FINKBEINER, M. u. a.: Towards Life Cycle Sustainability Assessment. In: *Sustainability* 2. Jg., Nr. 10, (2010), S. 3309-3322.
- GEISBERGER, E.; BROY, M.: (agendaCPS): Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems. München, 2012.
- GÖTZE, U.; LINDNER, R. u. a.: Energetisch-wirtschaftliche Bewertung des Einsatzes drehzahl geregelter Antriebe in Werkzeugmaschinen. In: *Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung und Bewertung technischer Systeme-Erkenntnisse aus dem Spitzentechnologiecluster (eniPROD): 1. und 2. Methodenworkshop der Querschnittsarbeits-*

- gruppe 1 Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung"des Spitzentechnologieclusters eni-PROD.* Chemnitz, 2013, S. 343-357.
- GÖTZE, U.; WEBER, T. u. a.: Target Costing für (Werkstoffe) - Potenziale und Methodik. In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik: Entwicklung, Fertigung, Prüfung, Eigenschaften und Anwendungen technischer Werkstoffe* 40. Jg., Nr. 7, (2009), S. 566–572.
- GÖTZE, U.: (Investitionsrechnung): Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben. 7. Aufl., Chemnitz, 2014.
- GÖTZE, U.: (Kostenrechnung) und Kostenmanagement. 5. Aufl., Chemnitz, 2010.
- GRAM, M.; GUGG, C.: (Einsatzmöglichkeiten) von Cyber-Physical Systems im Lebenszyklusmanagement von Anlagen. In: *Industrie Management* 29. Jg., (2013), S. 39–43.
- GRAUMANN, M.: Controlling: Begriff, Elemente, Methoden und (Schnittstellen). 5. Aufl., Herne, 2018.
- GÜNTHER, E.; PROX, M.: Die neue DIN EN (ISO Norm) 14051 zur Materialflusskostenrechnung. In: *Nachhaltigkeitscontrolling - Konzepte, Instrumente und Fallbeispiele für die Umsetzung.* Freiburg u.a., 2012.
- HAHN, D.; TAYLOR, B.: Strategische (Unternehmensplanung) - strategische Unternehmensführung: Stand und Entwicklungstendenzen. 9. Aufl., Berlin, 2006.
- HALOG, A.; MANIK, Y.: Advancing Integrated Systems Modelling (Framework) for Life Cycle Sustainability Assessment. In: *Sustainability* 3.2 (2011), S. 469–499.
- HAUSCHILD, M. Z.; ROSENBAUM, R. K.; OLSEN, S.: (Life Cycle Assessment). Kongens Lyngby u.a., 2017.
- HEIDEL, R. u. a.: (Basiswissen) RAMI 4.0: Referenzarchitekturmodell und Industrie 4.0-Komponente Industrie 4.0. 1. Aufl., Berlin u.a., 2017.
- HEINRICH, L. J.: Systemplanung. (Planung) und Realisierung von Informatik-Projekten: Band 1: Der Prozeß der Systemplanung, der Vorstudie und der Feinstudie. 7. Aufl., Berlin u.a., 2018.
- HEINZE, R.; MANZEI, C.; SCHLEUPNER, L.: Industrie 4.0 im internationalen Kontext: (Kernkonzepte), Ergebnisse, Trends. 2. Aufl., Berlin u.a., 2017.
- HELLMICH, A. u. a.: (Mehrwert) Cyber-physischer Produktionssysteme durch domänenübergreifende Modellierung. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 113. Jg., Nr. 10, (2018), S. 692–696.
- HESSE, S.; SCHNELL, G.: Sensoren für die Prozess-und (Fabrikautomation). 7. Aufl., Wiesbaden, 2018.
- HOFMANN, J.: Industrie 4.0 : Die digitale Fabrik - Auf dem Weg zur digitalen (Produktion). 1. Aufl., 2017.
- HORVÁTH, P.; GLEICH, R.; SEITER, M.: (Controlling). 13. Aufl., München, 2015.

- HORVÁTH, P.; MAYER, R.: (Prozesskostenrechnung) - Der neue Weg zu mehr Kostentransparenz und wirkungsvolleren Unternehmensstrategien. In: *Controlling* 1. Jg., Nr. 4, (1989), S. 214–219.
- KAGERMANN, H.: (Chancen) von Industrie 4.0 nutzen. In: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Wiesbaden, 2014, S. 603–614.
- KAGERMANN, H.; LUKAS, W.-D.; WAHLSTER, W.: Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem (Weg) zur 4. industriellen Revolution. In: *VDI Nachrichten* 13. Jg., Nr. 1, (2011), S. 2.
- KELLER, H.; RETTENMAIER, N.; REINHARDT, G. A.: Integrated Life Cycle Sustainability Assessment–A (Practical Approach) applied to Biorefineries. In: *Applied energy* 154. Jg., (2015), S. 1072–1081.
- KLEINE, A.: (Operationalisierung) einer Nachhaltigkeitsstrategie: Ökologie, Ökonomie und Soziales integrieren. Wiesbaden, 2009.
- KLOEPFFER, W.: Life Cycle (Sustainability) Assessment of Products. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 13. Jg., Nr. 2, (2008), S. 89.
- KÜHN, R.; GRÜNIG, R.: Grundlagen der strategischen Planung: ein integraler Ansatz zur (Beurteilung) von Strategien. 2. Aufl., Bern u.a., 2000.
- LANTERMANN, T.: Industrial Value-Chain (Initiative) - Impulsgeber in Japan und Asien. In: *Industrie 4.0 im internationalen Kontext*. Berlin u.a., 2017, S. 142–146.
- LEE, E. A.: (Cyber-physical Systems) - are computing foundations adequate. In: *Position paper for NSF workshop on cyber-physical systems: research motivation, techniques and roadmap*. Citeseer, 2006, S. 1–9.
- LEE, E. A.: Cyber Physical Systems: (Design Challenges). In: *2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*. Berkeley, 2008, S. 363–369.
- LETMATHE, P.; WAGNER, G. R.: (Umweltkostenrechnung). In: *Enzyklopädie der Betriebswirtschaftslehre - Handwörterbuch Unternehmensrechnung und Controlling* (2006).
- LÜTH, C.: (Funktion) und Herausforderungen von Cyber-Physical Systems. In: *Industrie 4.0 im internationalen Kontext*. Berlin u.a., 2017, S. 25–29.
- MAHLENDORF, M.: Entwicklung eines Entscheidungsmodells zur Anwendung von (Umweltkostenrechnungssystemen): Aktuelle Entwicklungen und Anwendungsbereiche. Dresden, 2005.
- MEADOWS, D. L. u. a.: Die (Grenzen) des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit. Stuttgart, 1972.
- MEYNERTS, L.: Lebenszyklusorientierte Wirtschaftlichkeitsanalysen und -bewertungen im Rahmen der Fabrikplanung. Chemnitz, 2015.
- MIKUS, B.; GÖTZE, U.; SCHILDT, M.: (Kooperation) zwischen Mensch und Roboter - ein Beitrag zur nachhaltigen Produktion?. In: *Der Betriebswirt* Nr. 2, (2016), S. 25–31.

- MOLTESEN, A.; BJORN, A.: LCA and (Sustainability). In: *Life Cycle Assessment*. Kongens Lyngby u.a., 2017, S. 43–55.
- MOLTESEN, A.; BONOU, A. u. a.: (Social Life Cycle Assessment): An Introduction. In: *Life Cycle Assessment*. Kongens Lyngby u.a., 2017, S. 401–422.
- MÜLLER, G.: Intelligente Objekte und Softwaredienste als Beitrag für ein nachhaltigeres (Lieferkettenmanagement). In: *Nachhaltigkeit - Unternehmerisches Handeln in globaler Verantwortung*. Wiesbaden, 2012, S. 153–169.
- PEARCE, D. W.; ATKINSON, G. D.; DUBOURG, W. R.: The Economics of (Sustainable Development). In: *Annual review of energy and the environment* 19.1 (1994), S. 457–474.
- PLATTFORM INDUSTRIE 4.0: (RAMI) 4.0 - Ein Orientierungsrahmen für die Digitalisierung. Zugriff am 02.05.2019. URL: [https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/rami40-einfuehrung-2018.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/rami40-einfuehrung-2018.pdf?__blob=publicationFile&v=4).
- PÖTTER, T.; FOLMER, J.; VOGEL-HEUSER, B.: Enabling Industrie 4.0 - Chancen und Nutzen für die (Prozessindustrie). In: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Wiesbaden, 2014, S. 159–172.
- PUFÉ, I.: (Nachhaltigkeit). 3. Aufl., Konstanz, 2017.
- QUINT, F.: Entwicklung einer (Referenzarchitektur) zur Integritätssicherung von Cyber-Physischen Systemen in dynamischen Produktionsumgebungen. Kaiserslautern, 2018.
- ROGALL, H.: (Nachhaltige Ökonomie). In: *Volkswirtschaftslehre für Sozialwissenschaftler*. Wiesbaden, 2013, S. 123–143.
- ROTH, A.: (Einführung) und Umsetzung von Industrie 4.0: Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis. Leinfelden-Echterdingen, 2016.
- ROY, D. T.: Industrie 4.0 - Gestaltung cyber-physischer Logistiksysteme zur Unterstützung des Logistikmanagements in der (Smart Factory). Berlin, 2017.
- SACHVERSTÄNDIGENRAT FÜR UMWELTFRAGEN (SRU): (Umweltgutachten) für eine dauerhaft-umweltgerechte Entwicklung. Wiesbaden, 1994.
- SAILER, U.: (Nachhaltigkeitscontrolling). 2. Aufl., Konstanz, 2017.
- SCHALTEGGER, S.; ZVEZDOV, D.: Wie werden (Nachhaltigkeitsinformationen) gemagt? Eine Exploration in führenden deutschen und britischen Unternehmen. In: *Nachhaltigkeit*. Wiesbaden, 2012, S. 275–285.
- SCHLICK, J. u. a.: Industrie 4.0 in der praktischen (Anwendung). In: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Springer, 2014, S. 57–84.
- SCHRACK, D.: Nachhaltigkeitsorientierte (Materialflusskostenrechnung): Anwendung in Lieferketten, der Abfallwirtschaft und Integration externer Effekte. Linz, 2015.
- SCHWEITZER, M. u. a.: (Systeme) der Kosten- und Erlösrechnung. 11. Aufl., München, 2015.

- SEITZ, M.: Speicherprogrammierbare (Steuerungen) für die Fabrik-und Prozessautomation: Strukturierte und objektorientierte SPS-Programmierung, Motion Control, Sicherheit, vertikale Integration. 4. Aufl., München, 2015.
- SEURING, S.: (Supply Chain Costing) - A Conceptual Framework. In: *Cost Management in Supply Chains*. Springer, 2002, S. 15–30.
- SIEPMANN, D.: Industrie 4.0 - (Grundlagen) und Gesamtzusammenhang. In: *Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0*. Berlin, 2016, S. 17–82.
- SIEPMANN, D.: Industrie 4.0–Fünf zentrale (Paradigmen). In: *Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0*. Berlin, 2016, S. 35–46.
- STEEGMÜLLER, D.; ZÜRN, M.: Wandlungsfähige Produktionssysteme für den (Automobilbau) der Zukunft. In: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Wiesbaden, 2014, S. 103–119.
- STEGER, U.: Umweltmanagement-Erfahrungen und (Instrumente) einer umweltorientierten Unternehmensstrategie. 2. Aufl., Frankfurt am Main, 1993.
- STEGER, U.: (Umweltmanagement). In: *Frankfurt am Main u.a.* (1988).
- VEIGT, M. u. a.: (Entwicklung) eines Cyber-Physischen Logistiksystems. In: *Industrie Management 1/2013-Vierte industrielle Revolution* (2013), S. 15–18.
- VEREINTE NATIONEN: Transformation unserer Welt: die (Agenda 2030) für nachhaltige Entwicklung. In: *Siebzigste Tagung, Ergebnisdokument* (2015), S. 2015.
- VOGEL-HEUSER, B.; DIEDRICH, C.; BROY, M.: (Anforderungen) an CPS aus Sicht der Automatisierungstechnik. In: *at - Automatisierungstechnik* 61. Jg., Nr. 10 (2013), S. 669–676.
- WALL, F.; SCHRÖDER, R. W.: Controlling zwischen (Shareholder Value) und Stakeholder Value: Neue Anforderungen, Konzepte und Instrumente. Klagenfurt u.a., 2009.
- WELGE, M. K.; AL-LAHAM, A.; EULERICH, M.: Strategisches Management: Grundlagen-Prozess-(Implementierung). Wiesbaden, 2017.
- WESTKÄMPER, E.: (Lebenszyklusbetrachtung) technischer Systeme. In: *Digitale Produktion*. Stuttgart u.a., 2013, S. 147–150.
- WESTKÄMPER, E. u. a.: (Digitale Produktion). Stuttgart u.a., 2013.
- WILD, J.: Grundlagen der (Unternehmensplanung). 4. Aufl., Opladen, 1982.
- ZENZ, A.: Strategisches (Qualitätscontrolling)-Konzeption als Metaführungslehre. Wiesbaden, 1999.
- ZITZMANN, I.; KARL, D.; HIRSCHNER, S.: (Nachhaltigkeitsaspekte) im Kontext von Digitalisierung und Industrie 4.0. In: *Geschäftsmodelle in der digitalen Welt*. Bamberg u.a., 2019, S. 475–491.

Zu den Autor\*innen

**Constanze Pfaff**

... ist wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Professur BWL – Betriebliche Umweltökonomie und Nachhaltigkeit (Fakultät für Wirtschaftswissenschaften) an der Technischen Universität Chemnitz. Sie besitzt einen Masterabschluss (M.Sc.) des Studiengangs Value Chain Management der Technischen Universität Chemnitz. Ihre Forschung ist in den Bereichen Nachhaltigkeit, Digitalisierung und nachhaltige Produktion angesiedelt.

E-Mail: [constanze.pfaff@wiwi.tu-chemnitz.de](mailto:constanze.pfaff@wiwi.tu-chemnitz.de)

## Übersicht Schriftenreihe Betriebliche Umweltökonomie und Nachhaltigkeitsmanagement

### 1/2023

Pfaff, C. (2023). Bewertung von cyber-physischen Systemen – State of the Art. in Arnold, M. (Hrsg.), Schriftenreihe Betriebliche Umweltökonomie und Nachhaltigkeitsmanagement, 1/2023, Chemnitz.

<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa2-851096>

### 2/2021

Arnold, M.; Kirchner, M. (2021). Nachhaltigkeit in der Argumentation stark machen. in Arnold, M. (Hrsg.), Schriftenreihe Betriebliche Umweltökonomie und Nachhaltigkeitsmanagement, 2/2021, Chemnitz.

<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa2-759639>

### 1/2021

Röhr, T. (2021). Kreislaufwirtschaft nach dem Cradle-to-Cradle-Vorbild: Wie kann ein geschlossener Ressourcenkreislauf erreicht werden? Eine Untersuchung unternehmerischer Konzepte mit Beispielen aus der Praxis. in Arnold, M. (Hrsg.), Schriftenreihe Betriebliche Umweltökonomie und Nachhaltigkeitsmanagement, 1/2021, Chemnitz.

<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa2-736590>

### 1/2020

Arnold, M. (2020). Gutes Klima – ein schmaler Grat zwischen Fakten und Interpretationen. in Arnold, M. (Hrsg.), Schriftenreihe Betriebliche Umweltökonomie und Nachhaltigkeitsmanagement, 1/2020, Chemnitz.

<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa2-708598>

### 2/2019

Regis, S. (2019). Sustainability Balanced Scorecard und Szenarioanalyse – Instrumente des Risikomanagements im Hinblick auf Identifikation, Bewertung, Steuerung und Überwachung von Nachhaltigkeitsrisiken. in Arnold, M. (Hrsg.), Schriftenreihe Betriebliche Umweltökonomie und Nachhaltigkeitsmanagement, 2/2019, Chemnitz.

<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa2-339109>

### 1/2019

Fischer, E. P. (2019). Die Einzelnen und ihre Energie. Der Blick auf den Menschen in der Sicht der Wissenschaft - Das Familienstellen, die Verschränkung und die Epigenetik. in Arnold, M. (Hrsg.), Schriftenreihe Betriebliche Umweltökonomie und Nachhaltigkeitsmanagement, 1/2019, Chemnitz. ISSN 2567-7934,

<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa2-328207>

### 1/2018

Helbling, V. (2018). Förderung umweltbewussten Verhaltens durch wirksame(re) Nachhaltigkeitskommunikation – Entwicklung eines interdisziplinären Kriterienkatalogs. in Arnold, M. (Hrsg.), Schriftenreihe Betriebliche Umweltökonomie und Nachhaltigkeitsmanagement, 1/2018, Chemnitz, ISSN 2567-7934,

<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-232658>

### 1/2017

Gröger, M. (2017). Unbewusstes beim Entscheiden in ökonomischen Kontexten am Beispiel von Framing im Nachhaltigkeitsbereich, in Arnold, M. (Hrsg.), Schriftenreihe Betriebliche

Umweltökonomie und Nachhaltigkeitsmanagement, 1/2017, Chemnitz, ISSN 2567-7934,  
<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-232779>