

Abstract

Die vorliegende Arbeit geht der Frage nach, wie das Smart Factory Modell die Nachhaltigkeit in Produktionsprozessen beeinflusst. Ausgehend von den theoretischen Grundlagen werden neue Merkmale für Produktionsprozesse in intelligenten Fabriken ermittelt und die Anforderungen der Nachhaltigkeit, untergliedert in ihren drei Dimensionen, festgelegt. Die anschließende Literaturrecherche liefert die nötigen Indizien für Einflussmöglichkeiten der Merkmale, Datentransparenz, Selbststeuerung und Flexibilität, die folgend in einer Beziehungsmatrix ganzheitlich eingeordnet werden. Die Matrix zeigt, dass alle Merkmale smarterer Produktionsprozesse einen Einfluss auf gewisse Anforderungen der Nachhaltigkeit haben. Die umfassende Datentransparenz in der Produktion beeinflusst insbesondere die ökologische Nachhaltigkeit im positiven Sinne durch neue Formen der Steuerung und Kontrolle. Durch die zunehmende Flexibilität, die sich in smarten Prozessen ergibt, resultieren vorwiegend ökonomische Chancen. Neben positiven zeigt die zunehmende Automation und Selbststeuerung auch negative Beziehungen und Risiken auf. Ungeklärt bleiben die Auswirkungen der Substitution des Menschen in der Produktion durch automatisierte Prozesse. Aus der Beziehungsmatrix geht dennoch ein überwiegend positiver Einfluss hervor. Diesen stehen allerdings grundsätzliche Herausforderungen, wie dem Abbau von Rohstoffen und der Datensicherheit, gegenüber, die im Abschluss und unabhängig von den Merkmalen smarterer Produktionsprozesse, erörtert werden.

Deskriptoren:

Industrie 4.0 – Smart Factory – Nachhaltigkeit – Smarte Produktionsprozesse – Cyber-Physisches-System – Beziehungsmatrix – nachhaltige Entwicklung

Inhaltsverzeichnis

Abstract	I
Inhaltsverzeichnis	II
Abkürzungsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VI
1. Einleitung	1
1.1. Problemstellung und Forschungsfrage.....	1
1.2. Methodisches Vorgehen.....	2
2. Smart Factory	3
2.1. Industrie 4.0	3
2.2. Begriffserklärung	6
2.3. Cyber-Physisches-System	8
2.4. Smarte Produktionsprozesse	13
2.4.1. Merkmale smarterer Produktionsprozesse	13
2.4.2. Ein fiktives Beispiel aus der Automobilindustrie.....	15
3. Nachhaltigkeit	17
3.1. Begriffserklärung	17
3.2. Drei-Säulen-Modell.....	19
3.2.1. Ökonomische Dimension.....	21
3.2.2. Ökologische Dimension	22
3.2.3. Soziale Dimension	23
3.3. Operationalisierung der Nachhaltigkeit durch Indikatoren	24
4. Beziehung zwischen Nachhaltigkeit und smarten Produktionsprozessen	26
4.1. Methodik.....	26
4.1.1. Beschreibung der Methodik	26
4.1.2. Anpassung der Methodik	28
4.2. Durchführung der Methodik.....	30
4.2.1. Identifikation der Produktionsprozessmerkmale	30
4.2.2. Identifikation der Anforderungen der Nachhaltigkeit	30
4.2.3. Durchführung der Literaturrecherche.....	31

4.2.4. Wechselwirkungen zwischen den Merkmalen	38
4.2.5. Erstellung der Beziehungsmatrix	39
4.2.6. Bedeutung der Merkmale für die Erfüllung der Anforderungen.....	42
5. Herausforderungen für die Nachhaltigkeit.....	43
5.1. Datensicherheit	44
5.2. Abbau von Rohstoffen.....	45
6. Fazit und Ausblick.....	47
Literaturverzeichnis	49
Eidesstattliche Erklärung	56

Abkürzungsverzeichnis

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CPS	Cyber-physisches System
GRI	Global Reporting Initiative
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
QFD	Quality Function Deployment
RFID	Radio-Frequency Identification
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WCED	World Commission in Environment and Development

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Untersuchungsfokus.....	2
Abbildung 2: Übersicht der industriellen Revolutionen	4
Abbildung 3: Produktionsumgebung der Smart Factory KL e.V.	8
Abbildung 4: Wesentliche Technologien zur Realisierung eines CPS.....	9
Abbildung 5: Produktionsprozess	13
Abbildung 6: Produktionsstraße und Fertigungsfluss	16
Abbildung 7: Drei-Säulen-Modell einer nachhaltigen Entwicklung.....	20
Abbildung 8: House of Quality mit den Schritten der Erstellung	28
Abbildung 9: Einstellung zu individuellen und persönlichen Produktvarianten .	32
Abbildung 10: Handlungsfelder und Einflussbereiche der Flexibilität auf die Nachhaltigkeit.....	34
Abbildung 11: Handlungsfelder und Einflussbereiche der Selbststeuerung auf die Nachhaltigkeit	36
Abbildung 12: Handlungsfelder und Einflussbereiche der Datentransparenz auf die Nachhaltigkeit	38
Abbildung 13: Zinnabbau auf der indonesischen Insel Bangka	46

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Produktion nach Auftrag und auf Lager im Vergleich.....	16
Tabelle 2: Indikatorenkatalog gemäß VDI 4070	25
Tabelle 3: Kennzahlen der Nachhaltigkeit für den Produktionsprozess.....	31
Tabelle 4: Anforderungen der Nachhaltigkeit an den Produktionsprozess	31
Tabelle 5: Beziehungsmatrix	41

1. Einleitung

Die digitale Transformation und die zunehmende Vernetzung der virtuellen mit der realen Welt spielen sowohl in unserer Gesellschaft als auch in der Wirtschaft eine große Rolle. Themengebiete wie Car Sharing, Smart Watches und Smart Home Lösungen, mit denen sich bspw. die Musikanlage im Wohnzimmer ganz einfach über das Tablet steuern lässt, prägen zunehmend unser alltägliches Leben. Die Wirtschaft, insbesondere das verarbeitende Gewerbe, beschäftigt sich dabei stark mit Themen wie Industrie 4.0, Robotik, Big Data oder Künstliche Intelligenz. Es ist die Rede von der vierten industriellen Revolution, die auf Grundlage der Digitalisierung voranschreitet.¹

Neben Unternehmen weckt der Begriff „Industrie 4.0“ auch das Interesse der Politik. 2011 hat die deutsche Bundesregierung ihre sogenannten Hightech-Strategie ausgestaltet, zu dessen zentralen Aktionsfeldern Industrie 4.0 und Smart Factory gehören. Ziel der Strategie ist es, durch eine umfassende Forschungsagenda die deutsche Industrie auf die industrielle Revolution vorzubereiten und die Wettbewerbsfähigkeit im globalen Sinne zu stärken.²

1.1. Problemstellung und Forschungsfrage

„Als Akteure mit gesellschaftlicher Verantwortung sind Unternehmen auch wichtige Akteure im Transformationsprozess in Richtung nachhaltiger Entwicklung.“³

In Deutschland hat das verarbeitende Gewerbe traditionell einen hohen Stellenwert und trägt einen großen Teil zur deutschen Wirtschaftsleistung bei. So machte dieser Wirtschaftsbereich exklusive Baugewerbe mit 194,57 Milliarden Euro insgesamt 25,42% der gesamten Bruttowertschöpfung im ersten Quartal 2019 aus.⁴ Dabei beschäftigt das produzierende Gewerbe rund 8,1 Millionen Menschen⁵ und macht gleichzeitig 23% des gesamten CO₂- Ausstoß in Deutschland aus.⁶ Das produzierende Gewerbe hat dementsprechend einen signifikanten Einfluss auf unser Leben, die Umwelt, Gesellschaft und den Wohlstand und somit auf eine nachhaltige Entwicklung.

¹ Vgl. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) o.J.

² Vgl. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) 2016, S. 2.

³ Beier et al. 2019.

⁴ Vgl. Statistisches Bundesamt 2019a.

⁵ Vgl. Statistisches Bundesamt 2019b.

⁶ Vgl. Umweltbundesamt 2019.

Nachhaltigem Wirtschaften und gesellschaftlicher Verantwortung kommen angesichts der Verschmutzung und Zerstörung von Ökosystemen und des fortschreitenden Klimawandels sowie dessen Folgen wie Naturkatastrophen, Ressourcenverknappung, Armut und politische Instabilität, eine immer bedeutendere Rolle zu.

Es stellt sich jedoch die Frage, ob produzierende Unternehmen dieser Verantwortung mithilfe von Smart Factory gerecht werden können und ob durch eine Transformation des Produktionsprozesses anhand des Smart Factory Modells eine nachhaltige Entwicklung in Unternehmen gefördert wird.

1.2. Methodisches Vorgehen

Gegenstand der Untersuchung ist der Einfluss des Smart Factory Modells auf die Nachhaltigkeit von Produktionsprozessen. Nachdem die wesentlichen theoretischen Begriffe erläutert werden, soll ein möglicher Einfluss über eine Literaturrecherche untersucht werden und mittels einer Beziehungsmatrix gemäß dem Quality Function Deployment (QFD) veranschaulicht werden. Die Beziehungsmatrix aus dem QFD ist ursprünglich eine Planungs- und Kommunikationsmethode, mit der die Beziehung zwischen den Kundenanforderungen und Leistungsmerkmalen von Produkten und Dienstleistungen dargestellt werden. Bezogen auf die Korrelationen zwischen Smart Factory und Nachhaltigkeit in der Produktion werden nicht Kundenanforderungen und Leistungsmerkmale, sondern die ökonomischen und ökologischen Nachhaltigkeitsindikatoren und die Eigenschaften und Fähigkeiten der Smart Factory gegenübergestellt. Die Beziehungsmatrix wird auf Basis einer umfassenden Literaturrecherche, mit

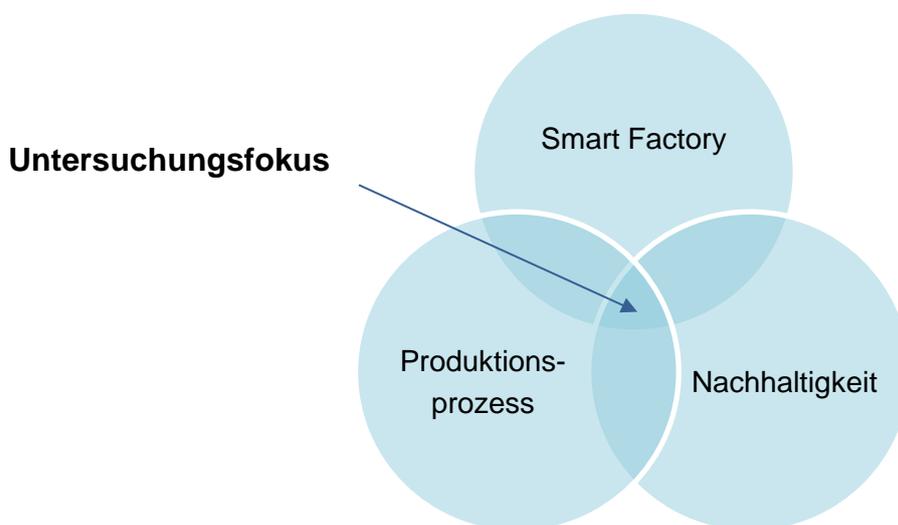


Abbildung 1 Untersuchungsfokus
Quelle: Eigene Darstellung

der Beziehungen zwischen Merkmalen und Anforderungen identifiziert werden, erstellt. Es wurde sich für diese Art der Methodik entschieden, da in der Praxis auswertbare, quantitativen Daten zum heutigen Stand zu rar sind, um statistische Korrelationsanalysen oder Bewertungsmethoden für Nachhaltigkeitsstrategien anzuwenden. Der Fokus liegt auf dem Einfluss auf die Nachhaltigkeit von bereits bestehenden Produktionsprozessen, die die Merkmale einer Smart Factory aufzeigen (siehe Abb. 1). Mögliche für die Nachhaltigkeit darstellende Herausforderungen bei der Anschaffung und Installation von smarten Produktionsprozessen werden im letzten Kapitel in einem kurzen Überblick vorgestellt.

Sowohl bei Smart Factory als auch bei der Nachhaltigkeit, handelt es sich um Begriffe, die nicht immer auf einheitliches Verständnis treffen. Daher sollen zu Beginn die theoretischen Grundlagen veranschaulicht werden. Der Teil gliedert sich in zwei Kapitel, in denen zunächst auf das Modell der Smart Factory eingegangen wird, um im Weiteren auf Nachhaltigkeit einzugehen.

2. Smart Factory

Das Modell der Smart Factory ist als Bestandteil des sogenannten Zukunftsprojektes Industrie 4.0 der Hightech-Strategie der deutschen Bundesregierung zuzuordnen.⁷ Um den Zusammenhang zwischen Industrie 4.0 und Smart Factory besser zu verstehen, muss zunächst auf das Projekt Industrie 4.0 näher eingegangen werden, um Smart Factory mit seinen Eigenschaften und Komponenten zu verstehen und smarte von konventionellen Produktionsprozessen unterscheiden zu können.

2.1. Industrie 4.0

Der Begriff ‚Industrie 4.0‘ steht für die vierte industrielle Revolution, einer neuen Stufe der Organisation und Steuerung des gesamten Wertschöpfungsnetzwerks über den Lebenszyklus von Produkten hinweg (siehe Abb. 2). Unter einer industriellen Revolution versteht man einen Vorgang, meist geprägt von technologischen Neuheiten, der einen strukturellen Wandel der Gesellschaft und Wirtschaft zur Folge hat. Die erste industrielle Revolution um 1750 zeichnete sich durch die Einführung mechanischer Anlagen mithilfe von Dampf- und Wasserkraft aus. Die Folge war überwiegend eine

⁷ Vgl. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) o.J.

gesteigerte Produktivität insbesondere in der Landwirtschaft, durch die Hungersnöte überwunden werden konnten und die Bevölkerung stark gewachsen ist. Rund 100 Jahre später wurde in der zweiten industriellen Revolution die arbeitsteilige Massenproduktion durch elektrische Energie ermöglicht. Während dieser Zeit setzte sich die Gesellschaft aufgrund zunehmender Verarmung der Fabrikarbeitserschaft mehr mit Wohlstand und dessen Verteilung auseinander. Neben einer gesteigerten Produktivität in der Fertigung gehören auch Gewerkschaften und Sozialdemokratie zu den Ergebnissen. Anfang der 1960er Jahre begann die dritte industrielle Revolution, die sich durch die Entwicklung und den Einsatz von IKT (Informations- und Kommunikationstechnologie) kennzeichnet, wodurch eine variantenreiche Serienfertigung ermöglicht und die Produktion zunehmend automatisiert wurde. Durch die Erfindung des Internets, das die Welt vernetzte, wurde der Welthandel bzw. die Globalisierung vorangetrieben. Viele westliche Länder entwickelten sich hin zu Dienstleistungsgesellschaften, in denen Produktionsstandorte in andere Länder verlegt wurden.⁸

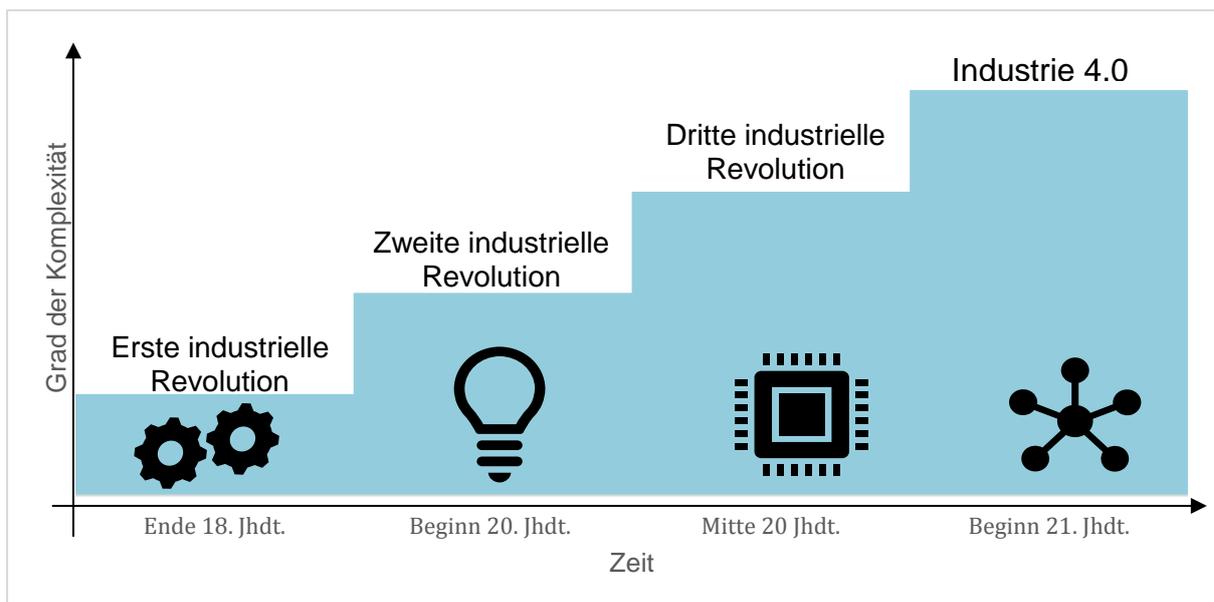


Abbildung 2 Übersicht der industriellen Revolutionen
 Quelle: In Anlehnung an Kagermann 2013, S. 17.

Heute ist die Rede von der vierten industriellen Revolution bzw. Industrie 4.0. Dabei handelt es sich mitunter um ein Zukunftsprojekt der Bundesregierung, dessen Ideen allen voran durch die sogenannte „Plattform Industrie 4.0“, dem zentralen

⁸ Vgl. Bauernhansl 2014, S. 5 ff.

Forschungsnetzwerk zu Industrie 4.0, umgesetzt werden sollen.⁹ Die Plattform Industrie 4.0, initiiert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, versteht unter Industrie 4.0 die intelligente Vernetzung von Maschinen und Abläufen in der Industrie, wodurch sich für die Industrie Möglichkeiten wie eine flexible und wandelbare Produktion, kundenzentrierte Lösungen, optimierte Logistikprozesse und Ressourcenschonung ergeben.¹⁰ Laut der Definition des Arbeitskreises Industrie 4.0 des BMBF handelt es sich bei Industrie 4.0 im engeren Sinne um „[...] die *technische Integration von CPS in die Produktion und die Logistik sowie die Anwendung des Internets der Dinge und Dienste in industriellen Prozessen – einschließlich der sich daraus ergebenden Konsequenzen für die Wertschöpfung, die Geschäftsmodelle sowie die nachgelagerten Dienstleistungen und die Arbeitsorganisation.*“¹¹

Die Plattform Industrie 4.0 verfolgt im Großen und Ganzen das Ziel, die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands als Produktionsstandort zu steigern und Industrie 4.0 in der produzierenden Industrie zu etablieren. Durch Handlungsempfehlungen und praxisnaher Beispiele, die aus Forschungsarbeit von Arbeitskreisen resultieren, soll den produzierenden Unternehmen die Einführung erleichtert und die Sinnhaftigkeit demonstriert werden.¹²

Eine wichtige Voraussetzung für Industrie 4.0 ist die Digitalisierung, die fälschlicherweise oft synonym verstanden wird. Allerdings handelt es sich bei Digitalisierung um einen Wandlungsprozess, bei dem durch digitale Geräte Unternehmensbereiche vernetzt werden. Daten und vor allem die verarbeitende Software dahinter gewinnen an Wichtigkeit und ersetzen Papier und Aktenordner. Die Digitalisierung von Unternehmensprozessen ist ein fundamentaler Grundbaustein, um Industrie 4.0 zu ermöglichen, aber kein Synonym.¹³

Letztendlich lässt sich festhalten, dass es sich bei Industrie 4.0 um die vierte industrielle Revolution, eine neue Stufe der Organisation und Steuerung des gesamten Wertschöpfungsnetzwerks, handelt. Durch Integration von CPS in die Produktion sowie durch die Anwendung des Internets der Dinge als Infrastruktur werden alle wertschöpfenden Instanzen miteinander vernetzt, Daten in Echtzeit bereitgestellt und verarbeitet. In Folge wird der Wertschöpfungsfluss durch autonome Kommunikation und

⁹ Vgl. Hänisch 2017, S. 10.

¹⁰ Vgl. Plattform Industrie 4.0, o.J. b.

¹¹ Kagermann 2013, S. 18.

¹² Vgl. Plattform Industrie 4.0, o.J. a.

¹³ Vgl. Huber 2018, S. 15.

Selbststeuerung der Instanzen optimiert.¹⁴ Unter diesen Voraussetzungen kann das Ziel einer hoch flexiblen Produktion mit Erfüllung individueller Kundenbedürfnisse umgesetzt werden.¹⁵ Praktische Anwendung findet das Konzept von Industrie 4.0 unter anderem in Form von Smart Factory, Smart Logistics, aber auch in Form intelligenter Stromnetze von Smart Grid.¹⁶

2.2. Begriffserklärung

In der Literatur sind keine eindeutigen Definitionen zu dem Begriff „Smart Factory“ zu finden. Daher wird in diesem Kapitel versucht mittels einer Analyse von Beschreibungsmodellen und Erklärungsversuchen von Smart Factory aus der Literatur den Konsens des Modells herauszuarbeiten. In der Literatur findet man für den Begriff „Smart Factory“ viele synonym verwendete Begriffe, die auch für diese Arbeit gleichbedeutend verwendet werden. Häufig verwendete Synonyme sind beispielsweise „intelligente Fabrik“, „Fabrik von Morgen“ oder „Fabrik der Zukunft“.¹⁷ Gleichbleibend ist das Wort Fabrik bzw. „Factory“. Fabriken als Betriebsform von Industrieunternehmen kennzeichnen sich durch eine stark mechanisierte Produktion von großen Produktmengen bei hoher Arbeitsteilung.¹⁸ Daraus ableitend bezieht sich das Smart Factory Modell auf Unternehmen, die die beschriebenen Merkmale aufweisen.

Das Modell der Smart Factory tritt unumgänglich mit Industrie 4.0 auf und gilt als praktische Umsetzung von Industrie 4.0 in der Industrie. Es beschreibt die echtzeitfähige, intelligente Vernetzung von Menschen, Maschinen und Objekten über internetähnliche Strukturen in einem produzierenden Unternehmen. Dadurch werden eine dynamische Steuerung und Organisation des Produktionssystems ermöglicht.¹⁹ Eine Smart Factory zeichnet sich dementsprechend durch die Integration von kollaborativen, unternehmensübergreifenden Produktionsnetzwerken in die klassische Produktionsumgebung aus.²⁰ Die Verknüpfung der Wertschöpfungsnetzwerke in Echtzeit wird durch die Integration moderner IKT ermöglicht, wodurch die intelligente Fabrik Maschinenbau und

¹⁴ Vgl. Sucky et al. 2018, S. 252.

¹⁵ Vgl. Karl/ Zitzmann 2018, S. 80.

¹⁶ Vgl. Kagermann 2013, S. 23.

¹⁷ Vgl. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 2017 S. 5; Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) o.J.

¹⁸ Vgl. Voigt 2018.

¹⁹ Vgl. Zillmann/ Wilk 2016, S. 9.

²⁰ Vgl. Teichert 2018, S. 30.

Informationstechnologie vereinigt.²¹ Kagermann beschreibt, in dem Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0 von 2013, Smart Factory als

„[...] einzelnes oder Verbund von Unternehmen, das / der IKT zur Produktentwicklung, zum Engineering des Produktionssystems, zur Produktion, Logistik und Koordination der Schnittstellen zu den Kunden nutzt, um flexibler auf Anfragen reagieren zu können. Die Smart Factory beherrscht Komplexität, ist weniger störanfällig und steigert die Effizienz in der Produktion. In der Smart Factory kommunizieren Menschen, Maschinen und Ressourcen selbstverständlich miteinander wie in einem sozialen Netzwerk.“²²

In einer weiteren Definition von Lucke et al. wird die Smart Factory wie folgt beschrieben:

“The Smart Factory is defined as a factory that context-aware assists people and machines in execution of their tasks. This is achieved by systems working in background, so-called Calm-systems and context aware means that the system can take into consideration context information like the position and status of an object. These systems accomplish their tasks based on information coming from physical and virtual world. Information of the physical world is e.g. position or condition of a tool, in contrast to information of the virtual world like electronic documents, drawings and simulation models. [...] Calm systems are referring in this context to the hardware of a Smart Factory. The main difference between calm and other types of systems is the ability to communicate and interact with its environment.”

Laut dieser Definition zeichnen sich Smart Factories vor allem durch dezentral organisierte, intelligente Systeme aus, die eigenständig mit ihrer Umgebung kommunizieren, interagieren und Aufgaben anhand physikalischer und virtueller Daten erledigen.²³

Schlüsselpunkt beider Definitionen ist die umfassende Vernetzung des Produktionssystems durch den Einsatz von moderner IKT. Dadurch wird den wertschöpfenden Komponenten eine selbstständige Interaktion mit anderen Komponenten und

²¹ Vgl. Thiele/ Meisen/ Jeschke (2019) S. 1 ff.

²² Kagermann 2013, S. 87.

²³ Lucke/ Constantinescu/ Westkämper 2008, S. 115 zitiert nach Hermann/ Pentek/ Otto 2015, S.10.

Organisationen ermöglicht. Dabei wird zwischen vertikaler und horizontaler Vernetzung unterschieden. Unter der vertikalen Vernetzung versteht man die Vernetzung aller Unternehmensebenen. Die horizontale Vernetzung beschreibt hingegen die vollständige Vernetzung aller Maschinen, Geräte und Mitarbeiter auf einer Unternehmensebene und zwischen Unternehmen, wie bspw. Lieferanten.²⁴

In der Praxis findet man Smart Factory Anlagen eher im Forschungsbereich, wie bspw. die Smart Factory der Technologie-Initiative SmartFactory KL e.V. (siehe Abb. 3), die die Produktionsumgebung einer intelligenten Fabrik simuliert. Die Anlage in Kaiserslautern fertigt



Abbildung 3 Produktionsumgebung der Smart Factory KL e.V.
Quelle: SmartFactory KL e.V. o.J.

ein beispielhaftes Produkt. Kunden können online konfigurierbare bzw. individualisierbare Visitenkartenetuis bestellen.²⁵ Fertigungsstätten, die das Smart Factory Modell vollständig implementiert haben, sind zum heutigen Stand in der Praxis selten bis nicht vorhanden. Allerdings haben im Jahr 2017 in Deutschland 46% der Unternehmen angegeben bereits laufende Prozesse im Sinne der Smart Factory eingeführt zu haben. Bei 30% der Unternehmen ist die Einführung solcher Prozesse zumindest in Planung.²⁶

2.3. Cyber-Physisches-System

Cyber-Physische-Systeme stellen die technische Basis bzw. Voraussetzung einer Smart Factory dar. Grundlegend ist es das Ziel eines solchen Systems die digitale mit der physischen Welt zu verbinden.²⁷ In diesem Kapitel wird zunächst geklärt was ein CPS ist und wie es aufgebaut ist. Näher wird auf die Schlüsseltechnologien zur Realisierung eines solchen Systems eingegangen, um darauf die Eigenschaften zu untersuchen.

²⁴ Vgl. Malanowski/Brandt 2014, S. 6.

²⁵ Vgl. SmartFactory KL e.V. o.J.

²⁶ Vgl. Caggemini 2017.

²⁷ Vgl. Lucke et al. 2014, S. 10.

Unter CPS fallen eingebettete Systeme, sprich ein für spezielle Anwendungen in Anlagen und Maschinen eingebettetes Computersystem, Produktions-, Logistik-, Engineering-, Koordinations- und Managementprozesse sowie Internetdienste, die durch digitale Netze miteinander verbunden sind und mithilfe von Sensoren physikalische Daten aufnehmen und mittels Aktoren auf physikalische Vorgänge einwirken.²⁸ Über eine multimodale Benutzerschnittstelle ist der Mensch mit dem CPS verbunden und kann diese bspw. über Sprache oder Touch Displays steuern und kontrollieren.²⁹ Die Interaktion mit der Umgebung wird neben smarte Sensoren und Aktoren außerdem durch die Vernetzung untereinander ermöglicht. Die Integration sorgt für einen Informationsaustausch zwischen den Systemen, wodurch bspw. Ressourcenmanagement autonom zwischen zwei Anlagen geschehen kann.³⁰



Abbildung 4 Wesentliche Technologien zur Realisierung eines CPS
Quelle: in Anlehnung an Bauernhansl 2014, S. 16 f.

CPS bestehen aus mechanischen Komponenten, wie Roboter und Maschinen und Anlagen, Software, Benutzerschnittstellen und moderner IKT. Betrachtet man die voraussetzenden Technologien eines CPS in Entwicklungsstufen, bildet die RFID-Technologie die erste Stufe (siehe Abb. 4).

RFID

Die Identifikation von physischen Objekten ist ein wichtiger Bestandteil eines CPS. Bei Radio-Frequency Identification (RFID) handelt es sich um ein System, mit dem Objekte über Funk identifiziert werden können. Objekte werden mit RFID-Datenträgern, meistens in Form von Chips bzw. Etiketten ausgestattet. RFID-Chips bestehen aus zwei Komponenten. Zum einem aus einem Transponder, auf dem Daten abgespeichert werden können inklusive einer Antenne. Bei der zweiten Komponente handelt es sich um ein Lesegerät, welches aus einer Lese-/Schreibereinheit mit Antenne und einer Schnittstelle zum Weiterleiten von Daten besteht. Über Radiowellen ist es dem Lesegerät möglich die auf dem Transponder abgelegten Daten auszulesen, auszuwerten und gegebenenfalls zu ändern.³¹

²⁸ Vgl. Kagermann 2013, S. 34.

²⁹ Vgl. Bauernhansl 2014, S. 16.

³⁰ Vgl. Lucke et al. 2014, S. 10.

³¹ Vgl. Strate/ Kersten 2005, S. 1.

Der RFID-Datenträger ist in der Lage berührungslos Informationen und Daten, die jederzeit sowie ortsunabhängig abrufbar sind, unverlierbar und in elektronischer Form abzuspeichern und abzurufen.³² Dadurch ist zum einen eine automatische Identifikation von physischen Objekten, die mit RFID-Datenträgern ausgestattet sind und zum anderen eine hohe Datentransparenz in der Produktion möglich.³³ Werden Werkstücke und Maschinen mit RFID-Chips versehen, ist es für die Maschine möglich, die individuellen Auftragsdaten, die in dem Datenträger des Werkstücks enthalten sind, auszu lesen und die Arbeitsschritte dementsprechend auszuführen. Somit ist der RFID-Chip auch ein wichtiges Element, um Kundenwünsche in der Groß- und Massenfertigung zu berücksichtigen.

Sensorik

Allein aus der Identifikation von Objekten wird aus einem CPS noch kein intelligentes System, da es weder über Speicher noch Auswertmöglichkeiten verfügt.³⁴ Im nächsten Schritt werden Sensoren und Aktoren integriert, mit denen eine Vielzahl an Daten aus dem Umfeld erfasst, gespeichert und verarbeitet werden können.³⁵ Ein smarter Sensor ist in der Lage, physische Messgrößen aus der Umwelt aufzunehmen und in digitale Messgrößen umzuwandeln, aufzubereiten und diese über eine Kommunikationsschnittstelle mit anderen Systemen zu teilen.³⁶ Die digitalen Daten werden über eine IP-fähige Kommunikationsschnittstelle von einem Aktor aufgenommen, der die elektrischen Signale über einen Mikroprozessor verarbeitet und daraufhin mechanische bzw. physikalische Vorgänge umsetzt.³⁷ Neben entsprechender Software ist die Sensorik und Aktorik wichtiger Bestandteil, damit CPS dezentral handeln können. Über die IP-fähigen Kommunikationsschnittstellen der Aktoren auch von fremden CPS Systemen ansteuern.³⁸ Eine solche Vernetzung erfordert allerdings die Internetfähigkeit der Systeme.

³² Vgl. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) 2016, S. 11.

³³ Vgl. Zillmann/ Wilk 2016, S. 32.

³⁴ Vgl. Bauernhansl 2014, S. 16.

³⁵ Vgl. Kagermann 2014, S. 605.

³⁶ Vgl. Lucke et al. 2014, S. 16.

³⁷ Vgl. Kagermann 2013, S. 84.

³⁸ Vgl. Lucke et al. 2014, S. 20.

Internet der Dinge

Durch die Vernetzung der mechanischen Komponenten über das Internet kann ein CPS als funktionsfähig beschrieben werden, da es nun in der Lage ist, komplexe Prozesse mithilfe von Software zu steuern, zu regeln und zu kontrollieren.³⁹ Bei der Integration der mechanischen Komponenten spielt die letzte technologische Grundlage eines CPS - das Internet der Dinge oder „Internet of Things“ - eine große Rolle. Unter dem Internet der Dinge ist die Verknüpfung physischer Objekte mit dem Internet oder einer internetähnlichen Struktur zu verstehen. Bspw. kann die automatische Identifikation physischer Objekte mittels RFID-Datenträgern eine Ausprägung des IoT sein. Neben der vertikalen Vernetzung der Komponenten eines einzelnen CPS sind die Systeme in der sich horizontal mit anderen Systemen, die bspw. auch außerhalb der Produktionsumgebung liegen können (z.B. mit einem Lieferant) zu vernetzen.⁴⁰

Neben diesen drei Schlüsseltechnologien gibt es noch viele weitere Technologien, wie den Einsatz von Künstlicher Intelligenz bzw. Maschinellem Lernen, Clouds oder sensiblen Robotern, mit denen der Optimierungsgrad des Produktionssystems durch CPS beeinflusst werden kann.⁴¹

Neue Fähigkeiten und Eigenschaften

Durch die verbesserte Soft- und Hardware und die Vernetzung verfügen CPS über neuartige Fähigkeiten.

Durch Verarbeitung großer Datenmengen kann die physische Welt realitätsgetreu abgebildet werden. Außerdem ist über eine Mensch-Maschinen-Schnittstelle eine Kommunikation mit dem Menschen möglich, der den Produktionsprozess anhand der verarbeiteten Daten jederzeit, gegebenenfalls ortsunabhängig kontrollieren und steuern kann.⁴² Dies befähigt CPS wiederum auf vorausschauend auf Situationen wie bspw. zukünftigen Ressourcenmangel zu reagieren. Hinzu kommen weitere wichtige Eigenschaften wie Lernfähigkeit und Fehlertoleranz.⁴³

³⁹ Vgl. Luber/ Litzel 2017.

⁴⁰ Vgl. Kagermann 2013, S. 24 & 85.

⁴¹ Vgl. Huber 2018, S. 32.

⁴² Vgl. Luber/ Litzel 2017.

⁴³ Vgl. Lucke et al. 2014, S. 10.

Geisberger et al. fassen 2012 in der Studie „agendaCPS“ auf Basis einer Analyse der Fähigkeiten systematisch die charakterisierenden Eigenschaften eines CPS wie folgt zusammen:

- *Verschmelzung von physikalischer und virtueller Welt*
- *System of Systems mit dynamisch wechselnden Systemgrenzen*
- *kontextadaptive und teils oder ganz autonom handelnde Systeme, aktive Echtzeitsteuerung*
- *kooperative Systeme mit verteilter, wechselnder Kontrolle umfassende Mensch-System-Kooperation*⁴⁴

Durch die adaptive Eigenschaft ist es einem CPS möglich, sich selbstständig anzupassen und mit der Umgebung zu interagierend. Darüber hinaus sind sie vorausschauend und robust und können durch Erfahrungswissen Wirkungen unterschiedlicher Einflüsse antizipieren und unerwartete Situationen eigenständig bewältigt werden. Über benutzerfreundliche Schnittstellen kann eine umfassende Mensch-System-Kooperation geschaffen werden.⁴⁵

Ein weiteres, wichtiges Merkmal zur Beschreibung von CPS ist der Dezentralisierungsgrad ihrer räumlichen Struktur. So können einzelne Objekte wie bspw. ein Chip, die Komponenten und Eigenschaften eines CPS aufweisen. Größere Systeme können Maschinen und Anlagen sein, die wiederum selbst Teil eines übergeordneten Systems – einer Smart Factory – sind.⁴⁶ Daraus lässt sich schließen, dass die Smart Factory selbst ein Cyber-Physisches System darstellt, welches wiederum selbst aus vielen miteinander vernetzten CPS besteht.

Eine Smart Factory entsteht durch Zusammenschluss zu autonomen und dezentralen einzelner CPS miteinander wodurch im Zusammenspiel mit dem Menschen eine eigenständige Optimierung und Problemlösung erfolgen kann.⁴⁷

⁴⁴ Vgl. Geisberger et al. 2012, S. 26.

⁴⁵ Vgl. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 2017, S. 125.

⁴⁶ Vgl. Lucke et al. 2014, S. 13.

⁴⁷ Vgl. Bauernhansl 2014, S. 16.

2.4. Smarte Produktionsprozesse

Unter einem Produktionsprozess versteht man den Vorgang der betrieblichen Leistungserstellung bei dem technologisch, zeitlich und örtlich bestimmte Produktionsfaktoren zu einer Ausbringungsmenge, dem Produkt, verarbeitet werden (siehe Abb. 5).⁴⁸ Mit der Inbetriebnahme einer Smart Factory Anlage und der Ausstattung mit Cyber-Physischen-Systemen können in der smarten Produktion neue Fähigkeiten umgesetzt werden.



Abbildung 5 Produktionsprozess
Quelle: Eigene Darstellung

Im folgenden Kapitel soll aufgezeigt werden, welche Merkmale sogenannte smarte Produktionsprozesse in einer Smart Factory aufweisen können und anhand eines fiktiven Beispiels aus der Automobilbranche aufgezeigt werden, welche Potenziale und räumliche Veränderungen im Vergleich zur konventionellen Produktion möglich sind.

2.4.1. Merkmale smarter Produktionsprozesse

Bisher wurden Produkte in der Regel durch nacheinander abgearbeitete Prozesse, sogenannte kontinuierliche Prozesse gefertigt.⁴⁹ Dieses Paradigma wird durch Fortschritte in der Forschungsarbeit grundlegender Technologien, wie Cyber-Physische Systeme (CPS), Robotik, RFID-Technik, Cloud-Systeme und Internet der Dinge bzw. Internet of Things (IoT) revolutioniert. Mittels der genannten technologischen Komponenten ist es in einer Smart Factory möglich, dass Menschen, Maschinen und Ressourcen im ganzen Produktionsprozess miteinander vernetzt sind und wie in einem sozialen Netzwerk kommunizieren können.⁵⁰ Durch den hohen Grad der Vernetzung im ganzen Unternehmen und zwischen Unternehmen weisen Produktionsprozesse neue Eigenschaften und Merkmale auf.

⁴⁸ Vgl. Weizsäcker et al. 2018.

⁴⁹ Vgl. Pötter/ Folmer/ Vogel-Heuser 2014, S. 159.

⁵⁰ Vgl. Kagermann 2014, S. 606.

Flexibilität

Der hohe Grad der Vernetzung der einzelnen an der Fertigung beteiligten Komponenten in Smart Factories führt außerdem zu einer hohen Flexibilität und Dynamik.⁵¹ Unter der Flexibilisierung der Fertigung versteht man die Wandlungs- und Anpassungsfähigkeit, die die Anlagen und Maschinen mit sich bringen, um auf wechselnde Bedingungen schnell zu reagieren, wodurch flexible Anlagen in der Lage sind mit geringem Aufwand und in kurzer Zeit auf veränderte Umweltbedingungen, wie bspw. Zeit, Bestand von Ressourcen und individuelle Auftrags Elemente, eingehen.⁵²

Dies führt zu einer gesteigerten Effizienz und Robustheit gegenüber Störungen in der Produktion.⁵³

Außerdem ist es durch die Flexibilität in einem nach dem Smart Factory Modell gestalteten Produktionssystem möglich, individuelle Kundenanfragen und -wünsche in Produkte zu integrieren und direkt bzw. in Echtzeit zu bedienen.⁵⁴ Nach Eingang des Auftrags beginnt unmittelbar die Produktion der individuellen Waren autonom gesteuert von der Produktionsanlage, die sich selbstständig an jeden Auftrag anpasst. So können im Stil der Massenfertigung individuelle Produkte gefertigt werden.⁵⁵

Automatisierte Selbststeuerung

Maschinen und Anlagen können in intelligenten Fabriken untereinander sowie mit Menschen und Ressourcen über moderne IKT kommunizieren und über diesem Weg Informationen bspw. zu Zielen, Plänen, Verfahren austauschen. Grundvoraussetzung dafür, dass Maschinen bspw. autonom ihre Auslastungsraten bestimmen und Produktionsstaus vermeiden können.⁵⁶ Die für die autonome Steuerung erforderlichen Fähigkeiten werden durch zusätzliche Komponenten in den Produktionseinheiten ermöglicht. Sensoren, Aktoren, RFID-Datenträgern, Soft- und Hardware bilden die Infrastruktur des selbststeuernden Produktionsprozesses.⁵⁷ Wichtiges Schlagwort, um autonomes Arbeiten von CPS zu ermöglichen, ist maschinelles Lernen.⁵⁸ Vereinfacht dargestellt wird dabei Wissen aus Erfahrungswerten generiert, indem Lernalgorithmen aus

⁵¹ Vgl. Kagermann 2013, S. 20.

⁵² Vgl. Steegmüller/ Zürn 2017, S. 28 ff.

⁵³ Vgl. Soder 2014, S.96

⁵⁴ Vgl. Niggemann/ Jasperneite/ Vodencarevic 2014, S.179.

⁵⁵ Vgl. Steven 2019, S. 172.

⁵⁶ Vgl. Ebd.

⁵⁷ Vgl. Scholz-Reiter/ Sowade 2011, S. 10.

⁵⁸ Vgl. Thiele/ Meisen/ Jeschke 2019, S. 12.

große Datenmengen komplexe Modelle entwickeln und diese auf neue Situationen projizieren. Daraufhin ist es den CPS möglich eigenständige Entscheidungen zu treffen.⁵⁹

Durch den Einsatz der genannten Technologien kommt es zur Veränderung der Industrieroboter. Herkömmliche Industrieroboter arbeiteten bisher in der Regel strikt von Menschen getrennt in Käfigen, da ihre komplexen, unvorhersehbaren Bewegungen zu schweren Unfällen führen können. Durch große Fortschritte in der Sensorik erkennen Leichtbauroboter Objekte und Menschen und können ihr Verhalten dementsprechend anpassen, sodass eine kooperative Zusammenarbeit zwischen Menschen und Roboter möglich wird.⁶⁰

Datentransparenz

Mit der umfassenden Ausstattung der CPS mit Sensoren und Aktoren, die in Echtzeit Daten des ganzen Produktionsprozesses erheben, verschmelzen reale und virtuelle Welt miteinander, wodurch es möglich wird jederzeit und ortsunabhängig ein digitales Abbild der Produktion abzurufen.⁶¹ Dabei werden unzählige Daten über das Internet bereitgestellt, aufbereitet und über Mensch-Maschinen-Schnittstellen wie Tablet-PCs oder Smartphones einsehbar. Zu den wichtigsten Daten in der Produktion gehören Auftragsdaten, Alarm-/Meldungsdaten, Prozessdaten, Dokumentationen, Maschinen und Anlagenparameter und Engineeringdaten.⁶² Die Auswertung und Bereitstellung der Daten in Echtzeit ermöglicht neue Potenziale für die Kontrolle und Steuerung des Produktionsprozesses.⁶³

2.4.2. Ein fiktives Beispiel aus der Automobilindustrie

Bisher mussten sich Unternehmen zwischen eher manuellen oder eher automatisierten Produktionssystemen entscheiden. Manuelle Systeme zeichnen sich durch ihre Flexibilität und der hohen Anzahl an Produktvarianten bzw. durch die Integration von Kundenwünschen aus, gelten allerdings auch als wenig produktiv. Automatisierte

⁵⁹ Vgl. Döbel et al. 2018, S. 8. 8

⁶⁰ Vgl. Steven 2019, S. 119.

⁶¹ Vgl. Bauernhansl 2014, S. 16; Shrouf/ Ordieres/ Miragliotta 2014, S. 699.

⁶² Vgl. Mayer/ Pantförder 2014, S. 482.

⁶³ Vgl. Steven 2019, S. 76.

Systeme hingegen sind hochproduktiv und können wesentlich höhere Taktzahlen erzielen, sind jedoch eher unflexibel und starr (siehe Tab. 1).

Eigenschaften	Make to order „Produktion nach Auftrag“	Make to Stock „Produktion auf Lager“
Lieferzeit zum Kunden	Lange	Kurz
Produktvolumen	Klein	Groß
Produktvarianten	Viele	Wenige
Planungshintergrund	Kundenauftrag	Prognose
Einbeziehung des Kunden	Vorhanden/ möglich	Keine

Tabelle 1 Produktion nach Auftrag und auf Lager im Vergleich
Quelle: In Anlehnung an Jonsson 2008 S. 154

In intelligenten Fabriken können die Vorteile beider grundlegend unterschiedlicher Produktionssysteme vereint werden, sodass es möglich wird in einem flexiblen Produktionsumfeld individualisierte Produkte zu hoher Produktivität, wie man es aus automati-

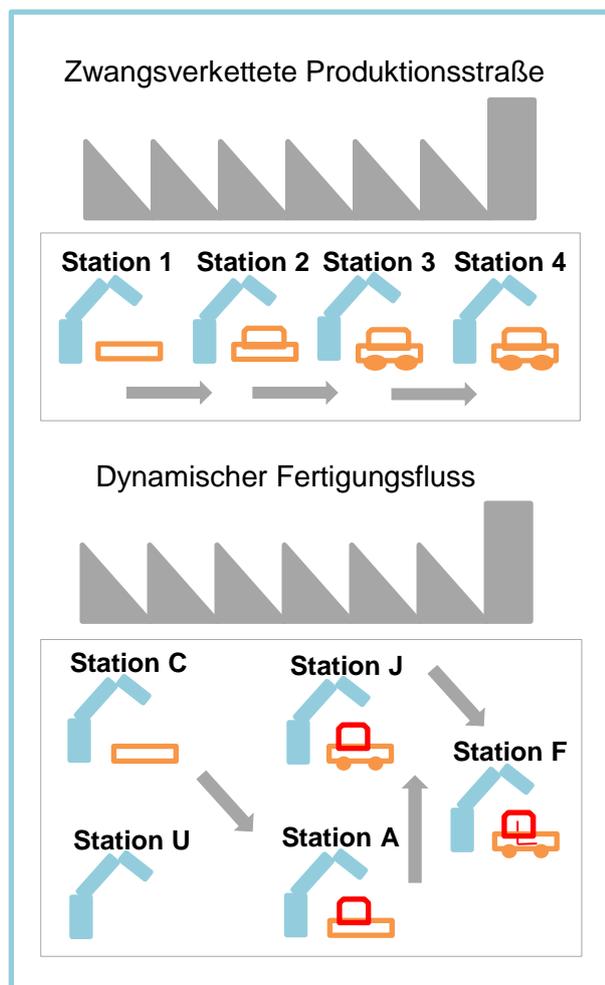


Abbildung 6 Produktionsstraße und Fertigungsfluss
Quelle: In Anlehnung an Kagermann 2013, S. 68.

sierten Produktionssystemen kennt, herzustellen.⁶⁴ Die Wandlungsfähigkeit der Produktion in einer Smart Factory ergibt sich durch eine Umgestaltung des kompletten Produktionsprozesses vom Fertigungstakt hin zu einem dezentral gesteuerten Fertigungsfluss.⁶⁵

In der Abbildung 5 wird zum einem die klassische, getaktete Fertigung und die entkoppelte, flexible Fertigung einer Smart Factory schematisch an dem Beispiel des Automobils aufgezeigt. Die klassische Fertigung hat durch zwangverketteten Produktionsstraßen einen statischen, starren bzw. unflexiblen Charakter. Neue Produktvarianten oder die Berücksichtigung individueller Kundenwünsche sind somit nur durch aufwendige Umrüstungen möglich.

⁶⁴ Vgl. Steegmüller/ Zürn 2017, S.34.

⁶⁵ Vgl. Steegmüller/ Zürn 2017, S.43.

Betrachtet man hingegen das hochintegrierte Produktionssystem in einer Smart Factory, durchläuft das Produkt autonom eine vom Auftrag abhängige Anzahl von CPS-fähigen Prozessmodulen, die dynamisch im Raum angeordnet sind. Durch dynamische Produktionsstraßen wird, zeitunabhängig von der vorgegebenen zentralen Taktung, ein Variantenmix und die Berücksichtigung individueller Kundenwünsche ermöglicht.⁶⁶

3. Nachhaltigkeit

Durch existenzbedrohende Probleme wie Klimawandel, zunehmende Ressourcenknappheit, Verlust der Biodiversität, demographischer Wandel und größer werdende Einkommensunterschiede, die die Menschheit konfrontieren, ist das Thema Nachhaltigkeit in der Gesellschaft längst von hoher Relevanz.

Trotz des zunehmenden Einzugs des Prinzips der Nachhaltigkeit in die Agenden der Politik, der Wirtschaft und der Gesellschaft, fehlt bisher eine allgemeingültige Definition, die in den unterschiedlichen Bereichen anerkannt wird.⁶⁷ In diesem Kapitel soll zunächst eine für die Arbeit, allgemein anerkannte Definition identifiziert werden. Darauf folgend wird das Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit beschrieben und auf die einzelnen Dimensionen genauer eingegangen. Abgeschlossen wird das Kapitel mit der Vorstellung von zwei gängigen Indikatorenkatalogen, durch die Nachhaltigkeit in Unternehmen messbar gemacht werden kann.

3.1. Begriffserklärung

In der Literatur werden die Begriffe „Nachhaltigkeit“ und „nachhaltige Entwicklung“ synonym verwendet. Die gilt auch für diese Arbeit.

Auch wenn der Begriff „Nachhaltigkeit“ heute in der Gesellschaft inflationär verwendet wird, handelt es sich dabei keineswegs um eine neuartige Erscheinung, sondern um einen Begriff mit langer Vergangenheit.⁶⁸

In der Geschichte taucht der Begriff das erste Mal im 17. Jahrhundert im Zusammenhang mit der Forstwirtschaft auf. Der Freiburger Oberhauptmann Hans Carl von Carlowitz legte mit seinen Forderungen den Grundstein für nachhaltiges Denken und

⁶⁶ Vgl. Kagermann 2013, S. 68.

⁶⁷ Vgl. Ternès 2019, S. 79.

⁶⁸ Vgl. Vieweg 2017, S. 41.

Handeln. So formulierte er im Bezug zur Forstwirtschaft, dass in einem Wald nur so viel Holz geerntet werden darf, wie der Wald in einer gewissen Zeit natürlich reproduzieren kann. Nach dieser Vorgehensweise sollte sichergestellt werden, dass die natürliche Ressource auch für weiterführende Generationen nutzbar ist und langfristig erhalten bleibt.⁶⁹

Mit der zunehmenden Industrialisierung und den ersten Umweltbewegungen legte der Club of Rome mit der 1972 veröffentlichten Studie „The Limits of Growth“ die Grundlage für die heutige Nachhaltigkeitsdebatte. Die wissenschaftliche Studie, die sich mit den Wechselwirkungen von gewissen Trends wie Industrialisierung, Bevölkerungsdichte, Energiebedarf, Nahrungsmittelressourcen, Ausbeutung von Rohstoffreserven und Zerstörung von Lebensraum befasst, kommt zu der Annahme, dass das derzeitige Wirtschaften dramatische globale Auswirkungen hat. Die Debatte kommt in der Gesellschaft an und im gleichen Jahr wird erstmals eine Umweltkonferenz der Vereinten Nationen in Stockholm abgehalten.⁷⁰

Zehn Jahre später, 1982, erfolgte die Gründung der World Commission in Environment and Development (WCED) durch die Vereinten Nationen. Die WCED oder auch Brundtland-Kommission genannt veröffentlichte 1987 den gleichnamigen Brundtland-Bericht „Our Common Future“, der sich ausgiebig auf politischer Ebene mit dem Thema Nachhaltigkeit auseinandersetzt und den Begriff nachhaltige Entwicklung erstmals definiert.⁷¹ Der Brundtland-Bericht definiert den Begriff in Kapitel 1 Absatz 49 wie folgt:

„Sustainable development seeks to meet the needs and aspirations of the present without compromising the ability to meet those of the future. Far from requiring the cessation of economic growth, it recognizes that the problems of poverty and underdevelopment cannot be solved unless we have a new era of growth in which developing countries play a large role and reap large benefits.“⁷²

Entscheidend ist der erste Satz des Absatzes. Demnach versteht man unter nachhaltiger Entwicklung die Befriedigung der Bedürfnisse der Gegenwart, ohne eine Bedürfnisbefriedigung der künftigen Generationen zu gefährden. Weiter wird beschrieben,

⁶⁹ Vgl. Lexikon der Nachhaltigkeit 2015.

⁷⁰ Vgl. Mayer 2017, S.2.

⁷¹ Vgl. Kropp 2019, S. 8.

⁷² World Commission on Environmental Development (WCED) 1987, S. 51.

dass Probleme wie Armut und Unterentwicklung nur durch eine „neue Ära des Wachstums“, also eine Umgestaltung des Prinzips des Wirtschaftswachstums, gelöst werden können. In Kapitel 2 Absatz 15 heißt es genauer:

*„In essence, sustainable development is a process of change in which the exploitation of resources, the direction of investments, the orientation of technological development and institutional change are all in harmony and enhance both current and future potential to meet human needs and aspirations.“*⁷³

Dementsprechend ist nachhaltige Entwicklung ein Wandlungsprozess bei dem der Abbau von Ressourcen, die Ziele von Investitionsaktivitäten, die Richtung technologischer Entwicklung und institutioneller Wandel zusammen harmonisieren und jetziges und künftiges Potenzial vergrößern, um menschlichen Bedürfnissen und Ansprüchen gerecht zu werden. Diese weitläufig anerkannte Definition gilt auch für die vorliegende Arbeit.⁷⁴

3.2. Drei-Säulen-Modell

Die Aufteilung des Begriffes Nachhaltigkeit in die Dimensionen Ökonomie, Ökologie und Soziales findet in vielen Definitionen Zustimmung und hat sich Mitte der 1990er Jahre international durchgesetzt. Das Modell liegt einer Vielzahl von Nachhaltigkeitsdefinitionen zugrunde und bildet für viele politische und betriebliche Nachhaltigkeitskonzepte und -strategien die Grundlage.⁷⁵

Auch wenn die Herkunft des Drei-Säulen-Modell (siehe Abb. 7) der nachhaltigen Entwicklung umstritten ist, wird das Modell in die deutsche Nachhaltigkeitsdebatte durch den Bericht der sogenannte Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des Deutschen Bundestages im Jahre 1995 eingeführt.⁷⁶ Das Modell ist die Antwort auf die einseitig geführte Nachhaltigkeitsdebatte aus der Umweltperspektive und formuliert zusätzlich zu den ökologischen Zielen, auch ökonomische und soziale Ziele

⁷³ World Commission on Environmental Development (WCED) 1987, S. 57.

⁷⁴ Anmerkung: Einen umfassenden Überblick über Definitionen des Begriffs „Nachhaltigkeit“ bietet unter anderem Tremmel 2003, S. 100 – 117.

⁷⁵ Vgl. Kleine 2009, S. 5.

⁷⁶ Vgl. Tremmel 2003, S. 116 f.

der Nachhaltigkeit. Das Ziel der daraus resultierenden drei Säulen der Ökologie, Ökonomie und Soziales ist eine nachhaltige Gesellschaftspolitik durch Verbesserung und Sicherstellung ökonomischer, ökologischer und sozialer Leistungsfähigkeit. Der Enquete-Kommission zufolge sind die drei Disziplinen eng miteinander verflochten, gleichwertig und gleichberechtigt, wodurch nur eine Optimierung aller drei Bereiche eine Optimierung der nachhaltigen Entwicklung zufolge haben kann.⁷⁷ Das Dreieck der Nachhaltigkeit sorgt also dafür, die Wirkungsgeflechte bzw. Wechselwirkungen zwischen den drei Kapitalarten besser zu verstehen.

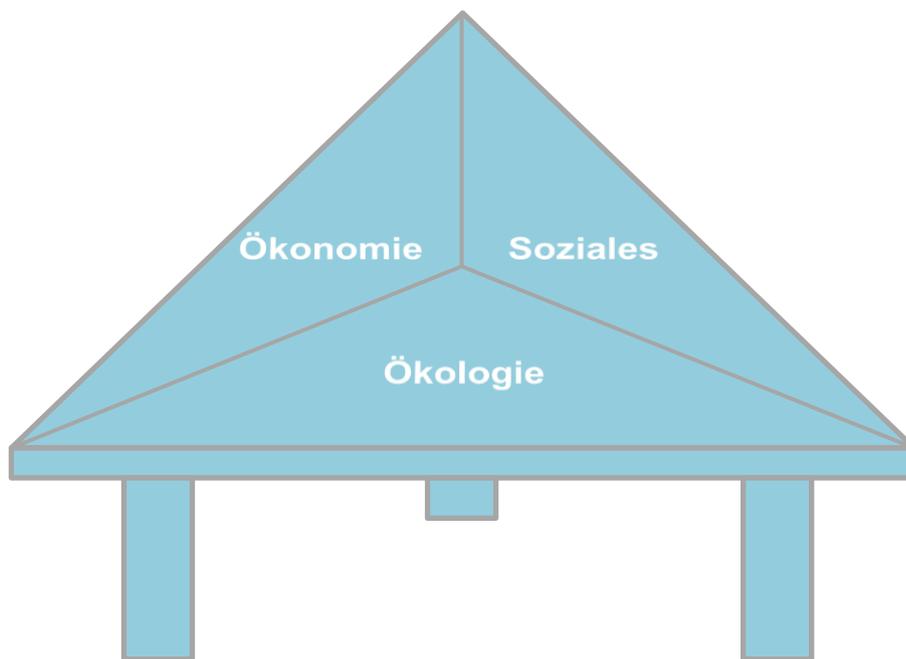


Abbildung 7 Drei-Säulen-Modell einer nachhaltigen Entwicklung
Quelle: In Anlehnung an Hillebrand et al. 2000, S. 31.

Zwischen den einzelnen Disziplinen herrscht aufgrund unkoordinierter Funktionsmechanismen, die ineinandergreifen und sich gegenseitig beeinflussen, ein großes Konfliktpotenzial. Neben positiven Effekten der Wechselwirkungen kann es häufig zu Zielkonflikten kommen in denen bspw. eine Handlung zwar einen positiven Effekt auf die eine Dimension, aber wiederum einen negativen auf die andere hat. Ziel ist es, jede konkrete politische oder wirtschaftliche Maßnahme so zu gestalten, dass sie auf alle drei Dimensionen eine positive bzw. zumindest keine negative Wirkung hat.⁷⁸

⁷⁷ Vgl. Bartol/ Herkommer 2004, S. 2.

⁷⁸ Vgl. Tremmel 2003, S. 119 f.; Hüther 1999, S. 21.

Im Folgenden wird aufbauend auf der Erläuterung des Drei-Säulen-Modells zunächst auf die ökonomischen Aspekte der Nachhaltigkeit eingegangen. Anschließend folgt die Ausführung der ökologischen und der sozialen Dimension.

3.2.1. Ökonomische Dimension

Die ökonomische Nachhaltigkeit beschreibt die betriebswirtschaftliche Nutzung eines Systems, dass in Form einer Organisation oder eines Unternehmens auftritt, sodass dieses dauerhaft bestehen kann und der wirtschaftliche Fortbestand gesichert ist.⁷⁹ Ziel der Dimension ist es, die Wirtschaftskraft langfristig zu stärken und die bestehende oder angestrebte Lebensqualität zu erhalten bzw. zu erreichen. Wirkungsvolle Mittel, die eine Stärkung der Wirtschaftskraft zur Folge haben, sind positive Entwicklungen von Innovationen, Investitionen in Anlagen, der Arbeitsproduktivität und Ausgaben für die Forschung und Entwicklung.⁸⁰

Ein wichtiger theoretischer Kontext für die ökonomische Nachhaltigkeit und Ausgangspunkt vieler Debatten ist die Wachstumstheorie, deren Kernaussage es ist, „[...] dass eine Steigerung des Pro-Kopf-Wachstums langfristig nur durch technischen Fortschritt möglich ist.“⁸¹

Im Bericht der Brundtland-Kommission wird ebenfalls die starke Bedeutung des technischen Fortschrittes und dessen Zusammenhang zu einem Wirtschaftswachstum hervorgehoben. Demnach sind Wachstum und der technische Fortschritt die Schlüssel zur Bekämpfung von Armut und Schaffung intragenerationeller Gerechtigkeit und zum Erhalt des wirtschaftlichen Fortbestands. Allerdings muss auch die Wirkung des technischen Fortschritts auf die Produktionsfaktoren Sachkapital, Arbeit und natürliches Kapital betrachtet werden. Wenn der technische Fortschritt zu Wachstum also einer Vermehrung des Sachkapitals und der Arbeit führt, die Produktivität des natürlichen Kapitals hingegen prinzipiell konstant bleibt, indiziert Wachstum einen steigenden Ressourcenbedarf, der wiederum zu Umweltbelastungen führen kann.⁸²

Kropp geht noch weiter und ist der Meinung, dass in einer endlichen Welt mit limitiertem Ressourcenvermögen Wachstum auf Dauer nicht funktionieren kann, da es zu Überbelastung der Umwelt kommt. Für die ökonomische Nachhaltigkeit sind daher

⁷⁹ Vgl. Pufé 2014, S. 106.

⁸⁰ Vgl. von Hauff 2014, S. 34.

⁸¹ Vgl. von Hauff 2014, S. 34; Pufé 2014, S. 107.

⁸² Vgl. Hillebrand et al. 2000, S. 32.

Wirtschaftssysteme notwendig, die mit Hinblick auf die zukünftigen Generationen bspw. keine Ressourcen ausbeuten oder hohe Schulden hinterlassen, um somit innerhalb der ökologischen Grenzen langfristig stabil zu bleiben.⁸³

Hingegen gibt es auch Meinungen, dass mithilfe des technischen Fortschritts eine teilweise Entkopplung von quantitativem Wachstum und der Nutzung des natürlichen Kapitals erreicht werden kann, wenn bspw. trotz Einsparungen von Ressourcen ein wirtschaftliches Wachstum erzielt werden kann.⁸⁴

Letztendlich lässt sich festhalten, dass die ökonomische Nachhaltigkeit ein umwelt- und sozialverträgliches Wirtschaften anstrebt, das nicht nur Wirtschaftswachstum sondern Lebensqualität anstrebt.⁸⁵

3.2.2. Ökologische Dimension

Funktionierende, ökologische Systeme sind für den Menschen überlebenswichtig. Die Relevanz der ökologischen Nachhaltigkeit liegt daher auf der Hand, da rein ökonomische und soziale Systeme alleinstehend nicht nachhaltig sein können. Die dauerhafte Existenz des Menschen und seiner Umwelt hängt vom ausgewogenen Zusammenhang der Wirtschaft und der Gesellschaft mit dem ökologischen System ab, denn das ökonomische System kann auf Dauer nicht nachhaltig sein, da es wie das ganze menschliche Leben vom ökologischen System und dessen Gesundheit abhängig ist.⁸⁶

Die ökologische Dimension beschreibt den Umgang mit dem ökologischen Kapitalstock mit dem Ziel diesen zu schützen und langfristig zu erhalten. Für Unternehmen bedeutet dies konkret, sich der Externalitäten der Aktivitäten bewusst zu werden und in einem ökologischen Zusammenhang bspw. in Form einer Umweltbilanz zu bewerten. Themenfelder, in denen in Unternehmen Verbesserungen angestrebt werden, sind insbesondere die Material- und Ressourcenproduktivität, die Minimierung von Emissionen und Abfällen sowie die Steigerung von Recycling- und Wiederverwendungsquoten.⁸⁷ Präziser formuliert Herman Daly, ein ehemaliger Senior Economist

⁸³ Vgl. Kropp 2019, S. 12.

⁸⁴ Vgl. Hillebrand et al. 2000, S. 32.

⁸⁵ Vgl. Pufé 2014, S. 107.

⁸⁶ Vgl. von Hauff 2014, S. 33.

⁸⁷ Vgl. Hardtke/ Prehn 2001, S. 60.

beim Environment Department der Weltbankgruppe, die drei wesentlichen Regeln der ökologischen Nachhaltigkeit:

- Die Abbaurrate von erneuerbaren Ressourcen darf nicht höher sein als ihre Regenerationsrate
- Das Niveau der Emissionen in ein Ökosystem darf dessen Assimilationsfähigkeit nicht überschreiten
- Der Verbrauch von erschöpfbaren, nicht regenerierbaren Ressourcen muss durch regenerierbare Ressourcen substituiert werden⁸⁸

3.2.3. Soziale Dimension

Weitgefasst hat die soziale Nachhaltigkeit das Ziel langfristig den sozialen Zusammenhalt in Unternehmen, Interessens- und Nichtregierungsorganisationen sowie den gesellschaftlichen Zusammenhalt in Humanität, Freiheit und Gerechtigkeit zu erhalten bzw. zu erreichen.⁸⁹

Die Übertragung des Nachhaltigkeitskonzept auf die soziale Dimension gestaltet sich schwerer als bei den Vorherigen, da sich die soziale Dimension nicht allein durch quantitative Regeln von Ressourcen formulieren lässt. Dennoch hat das Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE) die Charakteristika und Kernelemente der sozialen Nachhaltigkeit herausgearbeitet und aufbauend darauf fünf gestaltungsrelevante Größen für eine sozial nachhaltige Entwicklung als Leitorientierung definiert:

- Existenzsicherung jedes Individuums in der Gesellschaft
- Entwicklungsfähigkeit von sozialen Systemen und Strukturen
- Sozialressourcen sollen erhalten und weiterentwickelt werden
- Jedes Individuum soll die gleichen Chancen des Zugangs zu Ressourcen haben
- Unterstützung von Partizipation an gesellschaftlichen Entscheidungen⁹⁰

⁸⁸ Vgl. Kleine 2009, S. 15 f.

⁸⁹ Vgl. von Hauff 2014, S. 37.

⁹⁰ Vgl. Empacher/ Wehling 2002, S. 38 – 46.

Unter diesen Grundanforderungen sozialer Nachhaltigkeit sind sowohl Zielsetzungen wie Existenzsicherung, Chancengleichheit und Teilhabe an Entscheidungsprozessen enthalten, die ihren Ursprung in den Menschenrechten haben und zum anderen die Ziele, die sich aus analytischen Erkenntnissen herleiten wie zum Beispiel die Erhaltung und Weiterentwicklung sozialer Ressourcen.⁹¹ Unter soziale Ressourcen fallen z.B. Toleranz, Solidarität, Integrationsfähigkeit, Inklusion, Gemeinwohlorientierung, Recht- und Gerechtigkeitssinn.⁹²

3.3. Operationalisierung der Nachhaltigkeit durch Indikatoren

Die Regelsätze der einzelnen Dimensionen einer nachhaltigen Entwicklung sind eher allgemein gehalten, weswegen sie für die operationale Konkretisierung von Strategien und Prozessen in Unternehmen nur bedingt geeignet sind. Dennoch können sie für Willensbildungs- und Entscheidungsprozesse unterstützend sein.⁹³

Um Strategien und Prozesse im Sinne der Nachhaltigkeit zu gestalten, sind messbare Kennzahlen notwendig. Neben der Berichterstattung haben Kennzahlen aufgrund ihrer Messbarkeit eine Kontroll- und Steuerungsfunktion. Für politische und unternehmerische Nachhaltigkeitsstrategien gibt es diverse Leitlinien, die die entscheidenden Kennzahlen beinhalten.

In den meisten Unternehmen dienen ökonomischen Kennzahlen als ein wichtiges Werkzeug für die Ziel- und Strategieformulierung sowie für die Unternehmenssteuerung. Ökologische und soziale Kennzahlen gewinnen jedoch zunehmend an Bedeutung.⁹⁴ Gängige Richtlinien, die Aufschlüsse über relevante Indikatoren für Unternehmen geben, sind bspw. die international anerkannten „GRI Standards“ der Global Reporting Initiative (GRI). Auf nationaler Ebene ist die Leitlinie „VDI 4070“ des Vereins Deutscher Ingenieure hingegen, insbesondere für kleine und mittelständische Unternehmen sehr relevant.

GRI Standards

Die 1997 gegründete Global Reporting Initiative ist eine Nichtregierungsorganisation, die durch die Entwicklung Ihrer internationalen Richtlinie, den „*GRI Standards*“, eine

⁹¹ Vgl. Senghaas-Knobloch 2009, S. 547.

⁹² Vgl. Pufé 2014, S. 107.

⁹³ Vgl. Hillebrand et al. 2000, S. 34 f.

⁹⁴ Vgl. von Hauff 2014, S. 203 ff.

Verbesserung der Nachhaltigkeitsberichterstattung anstrebt. Die Richtlinie hat sich als Standard etabliert und wird weltweit von Unternehmen genutzt.⁹⁵

Die Richtlinie beinhaltet für die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit insgesamt 33 Handlungsfelder und mehr als 60 Kennzahlen. Dabei listet der umfangreiche und komplexe Indikatorenkatalog neben innerbetrieblicher auch eine Menge an unternehmens-externen Kennzahlen, weswegen sich dieser besonders für große Unternehmen eignet.⁹⁶

VDI 4070

Bei der VDI 4070 handelt es sich um eine nationale Richtlinie zum nachhaltigen Wirtschaften des Vereins Deutscher Ingenieure, die insbesondere an kleine und mittelständische Unternehmen gerichtet ist. Im Gegensatz zu den „GRI Standards“ ist die Richtlinie enger gefasst und deckt eher innerbetriebliche Faktoren ab (siehe Tab. 3).⁹⁷

Wirtschaft	Umwelt	Gesellschaft
<ul style="list-style-type: none"> • Betriebsergebnis • Eigenkapitalquote • Eigenkapitalrendite • Fremdkapitalrendite • Return on Investment • Netto-Wertschöpfung • Ausschussquote • Anzahl zertifizierter Lieferanten • Fehlerkosten • Umsatzwachstum • F&E – Anteil • Anlagevermögen • Working Capital • Personalproduktivität • Wertbeitrag 	<ul style="list-style-type: none"> • Rohstoffeinsatz • Energieverbrauch • Wasserverbrauch • Abwassermenge • Emissionen in der Luft • Emissionen ins Abwasser • Abfallmenge • Gefahrstoffe • Gefahrstoffanteil • Anteil recycelter Materialien • Flächenverbrauch • Anteil regenerativer Energiequellen • Anteil Verpackungen • Umweltbelastung je Transportleistung • Anteil Umweltschutzinvestitionen • Aufwendungen zum betrieblichen Umweltschutz • Beschwerdefälle wegen Umweltbelastungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Mitarbeiteranzahl • Anzahl der Auszubildenden • Gesundheitsquote • Unfallquote • Fluktuationsquote • Gleichverteilung der Altersstruktur der Mitarbeiter • Personalentwicklungsquote • Lärmbelästigung am Arbeitsplatz • gleichberechtigte Berücksichtigung von Frauen in Führungspositionen • Schulungsindex • Qualifizierungsindex • Einbindung Forschung und Lehre • Stakeholderdialog • Nachbarschafts-verhältnis • Lieferantenverhältnis • Betriebszugehörigkeit • Mitarbeiterbeteiligung

Tabelle 2 Indikatorenkatalog gemäß VDI 4070

Quelle: In Anlehnung an VDI 4070, 2016, S. 16 – 21 .

⁹⁵ Vgl. Global Reporting Initiative (GRI) 2019.

⁹⁶ Vgl. von Hauff 2014, S. 204.

⁹⁷ Vgl. von Hauff 2014, S. 205.

Ziel der Richtlinie ist es „[...] den wirtschaftlichen Erfolg, die Umweltverträglichkeit und den sozialen Frieden in einem Betrieb auf Dauer zu festigen, um dadurch den von der Allgemeinheit erwartenden Beitrag zur Gesellschaft zu erfüllen.“⁹⁸ Auch die VDI 4070 Richtlinie gliedert sich, wie die Leitlinie der GRI nach den drei Dimensionen der nachhaltigen Entwicklung.

4. Beziehung zwischen Nachhaltigkeit und smarten Produktionsprozessen

Nachdem im vorherigen Kapitel die theoretischen Grundlagen für diese Arbeit dargelegt wurden, soll in diesem Kapitel der Einfluss einer intelligenten Fabrik auf die Nachhaltigkeit untersucht und konkretisiert werden. Dabei wird zunächst in die Methodik eingeleitet und im Anschluss die Literatur auf Anhaltspunkte zu Einflüssen von smarten Produktionsprozessen auf die ökonomische, ökologische und soziale Nachhaltigkeit untersucht. Darauf folgend sollen die Beziehungen zwischen den Merkmalen einer Smart Factory und den Anforderungen an die Nachhaltigkeit, die bereits in Kapitel 2 und 3 erarbeitet wurden, mit einer Beziehungsmatrix aufgezeigt werden.

4.1. Methodik

Das folgende Unterkapitel umfasst alle Informationen zur gewählten Methode der Beziehungsmatrix. Anfangs wird die Methode beschrieben und aufgezeigt, weshalb sie zur Untersuchung ausgewählt wurde. Um die Untersuchung mit der Methode vollziehen zu können sind einige inhaltliche Anpassung der Durchführungsschritte notwendig, die im zweiten Unterkapitel erklärt werden. Anschließend folgt die Durchführung.

4.1.1. Beschreibung der Methodik

Die Beziehungsmatrix wird, angelehnt an dem House of Quality, aus dem Quality-Function-Deployment (QFD) Konzept erstellt.⁹⁹ Mittels dem House of Quality, einem Matrizenetzwerk, werden ursprünglich die Kundenanforderungen an ein Produkt in technisch-konstruktive Spezifikationen und Merkmale übersetzt. Im House of Quality

⁹⁸ Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 2016, S. 3.

⁹⁹ Anmerkung: Bei dem QFD handelt es sich um ein Konzept von Yoji Akao, das erstmalig 1966 in Japan eingesetzt wurde um Kundenanforderungen in Produkteigenschaften zu übersetzen. Das QFD bietet spezielle Methoden zur Qualitätssicherung des gesamten Produktentwicklungsprozesses. Es handelt sich um ein Verfahren, das sich insbesondere an den Bedürfnissen der Kunden orientiert, die in Entwurfsanforderungen, -ziele und Qualitätssicherungspunkte übersetzt. Vgl. Akao 1992, S. 15 – 21.

(siehe Abb. 8) werden die Beziehungen zwischen gewichteten Kundenanforderungen und Produktmerkmalen aufgezeigt, bewertet und mit dem Wettbewerb verglichen. Damit ist es möglich die Rangfolge der Qualifikationskriterien aus technischer Sicht zu identifizieren und Optimierungspotenziale zur Erfüllung der Kundenanforderungen zu erkennen.¹⁰⁰ Anwendung findet diese Methodik insbesondere im Qualitätsmanagement. Das House of Quality kann in folgenden 10 Schritten erstellt werden.

1. Schritt: Identifikation technischer Produktmerkmale
2. Schritt: Vergleich des Produktes mit dem Wettbewerb
3. Schritt: Identifikation der Kundenanforderungen
4. Schritt: Optimierungsrichtung der Produktmerkmale festlegen
5. Schritt: Erstellung der Beziehungsmatrix
6. Schritt: Wechselwirkungen zwischen den Produktmerkmalen bestimmen
7. Schritt: Bewertung der technischen Umsetzung
8. Schritt: Zielwerte für Produktmerkmale festlegen
9. Schritt: Technischer Vergleich mit dem Wettbewerb
10. Schritt: Bedeutung der Produktmerkmale für die weitere Bearbeitung zur Erfüllung der Anforderungen¹⁰¹

¹⁰⁰ Vgl. Rabl 2009, S. 133 ff.

¹⁰¹ Vgl. Saatweber 2007, S. 190 ff.

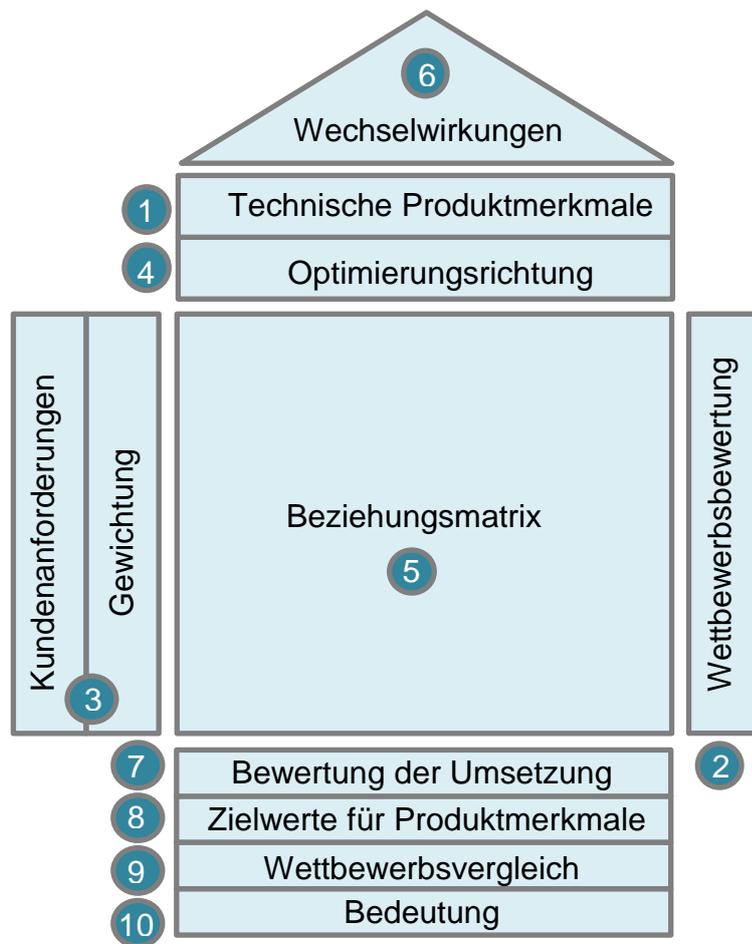


Abbildung 8 House of Quality mit den Schritten der Erstellung
 Quelle: In Anlehnung an Rabl 2009, S. 133.

Die Methodik wurde ausgewählt, da sich mit der Beziehungsmatrix komplexe Zusammenhänge erkenntlich machen lassen, woraus sich Aufschlüsse zur Erfüllung der Anforderungen ergeben. Andere Methoden, die spezifisch zur Bewertung der Nachhaltigkeit in Unternehmen bzw. Unternehmensprozessen vorgesehen sind, wie bspw. das integrierende Nachhaltigkeitsdreieck (IND)¹⁰², eignen sich hier leider nicht, da sie spezifische Unternehmenswerte zu den Kennzahlen erfordern, die für diese Arbeit nicht vorliegen.

4.1.2. Anpassung der Methodik

Um mithilfe dieser Methodik den Einfluss des Smart Factory Modells auf die Nachhaltigkeit von Produktionsprozessen aufzuzeigen, müssen einige Anpassungen

¹⁰² Anmerkung: Mit dem integrierenden Nachhaltigkeitsdreieck kann der Verlauf ausgewählter Indikatoren einer Strategie in den nachhaltigen Kontext eingeordnet und bewertet werden. Für ausführlichere Informationen siehe Kleine 2009, S. 83 ff.

vorgenommen werden. Anstelle der Kundenanforderungen auf der vertikalen Achse werden die Anforderungen an die Nachhaltigkeit aus den Indikatorenkatalogen abgeleitet.

Eine Gewichtung dieser fällt hier weg, da alle Anforderungen der Nachhaltigkeit, wie in Kapitel 3.3. beschrieben, gleichbedeutend sind. Außerdem werden in die Zellen der horizontalen Achse, anstatt der technischen Produktmerkmale, die Merkmale eines Produktionsprozesses getreu dem Smart Factory Modell eingetragen. Die Schritte 4 (Optimierungsrichtung der Produktmerkmale), 7 (Bewertung der technischen Umsetzung) und 8 (Zielwerte für Produktmerkmale festlegen) können eliminiert werden, da die Eigenschaften eines Produktionsprozesses nach dem Smart Factory Modell im Allgemeinen beleuchtet werden. Wenn es konkreter wird und ein Unternehmen ihre Prozesse entsprechend anpassen, können sie die Schritte mit aufnehmen und bspw. spezifisch individuelle Zielwerte festlegen.

Anstelle eines Vergleichs mit dem Wettbewerb, könnte in diesem Fall ein Vergleich zwischen Smart Factory Produktionsprozessen und konventionellen Produktionsprozessen vollzogen werden. Bei der Umsetzung von Smart Factory in den Produktionsprozess werden technologische Teilinnovationen in bestehende Produktionsprozesse implementiert. Somit kann ein smarterer Produktionsprozess als eine Weiterentwicklung bzw. Veränderung verstanden werden, bei der der konventionelle Prozess die Ausgangslage bildet. Somit ergibt sich durch die Ermittlung von positiven und negativen Auswirkungen smarterer Produktionsprozesse auf die Anforderungen der Nachhaltigkeit automatisch ein Vergleich.

Daraus resultierend ergeben sich für die Durchführung folgende Schritte:

1. Schritt: Identifikation der Produktionsprozessmerkmale
2. Schritt: Identifikation der Anforderungen der Nachhaltigkeit
3. Schritt: Literaturrecherche zur Untersuchung der Beziehungen
4. Schritt: Wechselwirkungen zwischen den Prozessmerkmalen bestimmen
5. Schritt: Erstellung der Beziehungsmatrix
6. Schritt: Bedeutung der Merkmale für die Erfüllung der Anforderungen

Die Literaturrecherche in Schritt 3 wurde zusätzlich hinzugefügt, da diese die Datengrundlage für die Beurteilung der Beziehungen und Erstellung der Beziehungsmatrix bildet.

4.2. Durchführung der Methodik

Die Methode wird anhand der im vorherigen Kapiteln beschriebenen Schritte durchgeführt. Besonderer Fokus wird auf dabei die Literaturrecherche gelegt.

4.2.1. Identifikation der Produktionsprozessmerkmale

Unter einem Merkmal wird ein charakteristisches Zeichen verstanden, dass eindeutig einer Person, Sache oder einem Zustand zugeordnet werden kann.¹⁰³ Aus der Erläuterung des Smart Factory Modells in Kapitel 2.4.1. geht hervor, welche Merkmale ein Produktionsprozess in einer intelligenten Fabrik hat. Zusammengefasst wurden dabei folgende Merkmale identifiziert:

- Flexibilität
- Automatisierte Selbststeuerung
- Datentransparenz

In der Beziehungsmatrix wird analysiert, ob zwischen diesen Merkmalen und den vorher aufgelisteten Anforderungen der Nachhaltigkeit Beziehungen bestehen und wie diese aussehen. Dafür werden im folgenden Unterkapitel die entsprechenden Anforderungen für die Nachhaltigkeit identifiziert.

4.2.2. Identifikation der Anforderungen der Nachhaltigkeit

Zur Bewertung der Nachhaltigkeitsleistung von intelligenten Produktionsprozessen nach dem Smart Factory Modell können unterschiedliche ökonomische, ökologische und soziale Kriterien herangezogen werden. Als Grundlage für die Kriterien dienen die Richtlinien der GRI und des VDIs, die bereits im Kapitel 3.3. vorgestellt wurden. Die Richtlinien beinhalten Kennzahlen, die zur Beurteilung der nachhaltigen Entwicklung des ganzen Unternehmens verwendet werden können. In der Beziehungsmatrix sollen allerdings nur Anforderungen berücksichtigt werden, die auch im Produktionsprozess von Bedeutung sind.

In der folgenden Tabelle werden die Indikatoren dargestellt, die für den Produktionsprozess relevant sind. Die Grundlage dafür stellen die beiden Indikatorkataloge dar.

¹⁰³ Vgl. Dudenredaktion o.J.

Ökonomische Kennzahlen	Ökologische Kennzahlen	Soziale Kennzahlen
<ul style="list-style-type: none"> • Umsatz¹⁰⁴ • Herstell- und Fehlerkosten¹⁰⁵ • Ausschussquote 	<ul style="list-style-type: none"> • Rohstoffeinsatz • Energieverbrauch • Wasserverbrauch • Abfallmenge • Emissionen in Luft und Abwasser 	<ul style="list-style-type: none"> • Mitarbeiteranzahl • Unfallquote • Aus- und Weiterbildung

Tabelle 3 Kennzahlen der Nachhaltigkeit für den Produktionsprozess
Quelle: Eigene Darstellung

Die Indikatoren müssen nun in Anforderungen übersetzt werden. Die Anforderungen der Nachhaltigkeit an den Produktionsprozess sind so formuliert, dass sie den Regeln und Grundsätzen der Nachhaltigkeit in allen drei Dimensionen gerecht werden (siehe Tab. 4).

Ökonomische Anforderungen	Ökologische Anforderungen	Soziale Anforderungen
<ul style="list-style-type: none"> • Umsatzwachstum • Einsparung von Herstell- und Fehlerkosten • Reduktion des Ausschusses 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduktion des Rohstoffeinsatzes • Reduktion des Energieverbrauchs • Reduktion des Wasserverbrauchs • Reduktion der Abfallmenge • Reduktion der Emissionen in Luft und Wasser 	<ul style="list-style-type: none"> • Vermeidung von Entlassungen • Verringerung der Unfallquote • Hohe Rate an Aus- und Weiterbildungen

Tabelle 4 Anforderungen der Nachhaltigkeit an den Produktionsprozess
Quelle: Eigene Darstellung

Letztendlich ergeben sich aus den Indikatorkatalogen elf Anforderungen, die für den smarten Produktionsprozess von Relevanz sind. Die Anforderungen sind so formuliert, dass Sie im Vergleich zum konventionellen Produktionsprozess eine Optimierung bzw. Verbesserung der Nachhaltigkeit darstellen.

4.2.3. Durchführung der Literaturrecherche

Im Folgenden werden die aus Literaturreche ermittelten Ergebnisse aufgezeigt. Ausgehend von den ermittelten Kennzahlen der Nachhaltigkeit werden die Einflüsse der Merkmale intelligenter Produktionsprozesse auf diese aufgezeigt.

¹⁰⁴ Vgl. GRI 2018, S. 6.

¹⁰⁵ Vgl. ebd.

4.2.3.1. Einfluss der Flexibilität

Der Einsatz von Hard- und Software hat eine gesteigerte Flexibilisierung des Produktionsprozesses zufolge. Durch die hohe Flexibilität ergeben sich bei Fertigungstypen, die große Produktmengen herstellen, insbesondere der Großserien- und Massenfertigung, neue Potenziale, indem Kundenwünsche in die Gestaltung und Funktionalität der Produkte einfließen. Bisher war die Herstellung individueller Produkte in der Massenfertigung mit hohen Kosten und Aufwänden verbunden. Mit wandlungsfähigen Maschinen und Anlagen, die sich autonom an Aufträge anpassen können, ist es möglich, kleinste Produktmengen, unter Berücksichtigung individueller Produkthanforderungen, zu den Kosten eines standardisierten Massenprodukts herzustellen.¹⁰⁶

Die Nachfrage nach einer großen Auswahl an Produktvarianten sowie die Individualisierung der Produkte führt zu einem steigenden Umsatz.¹⁰⁷ Ein weiterer Grund für eine Umsatzsteigerung ist die höhere Preisbereitschaft der Kunden für individualisierte Produkte.¹⁰⁸

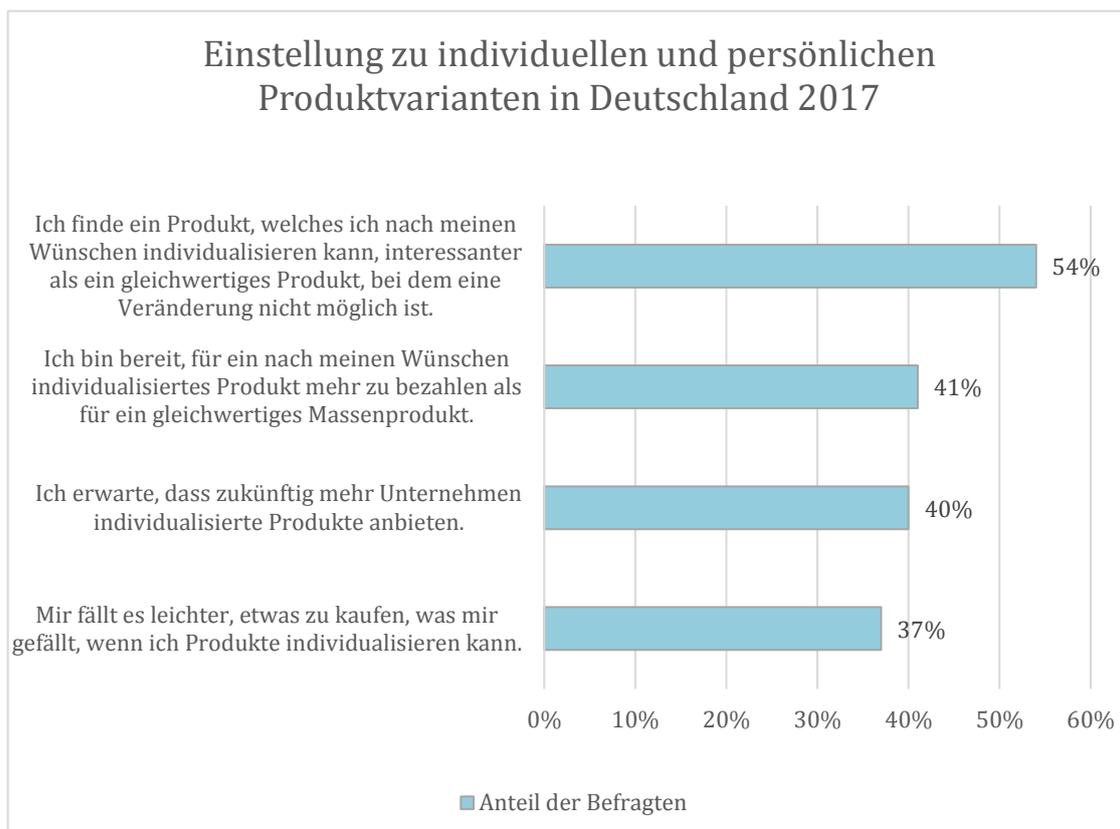


Abbildung 9 Einstellung zu individuellen und persönlichen Produktvarianten in Deutschland 2017
Quelle: In Anlehnung an LZ 2017.

¹⁰⁶ Vgl. Kagermann 2014, S. 608.

¹⁰⁷ Vgl. Gerbert et al. 2015.

¹⁰⁸ Vgl. Steven 2019, S. 204.

Eine Umfrage zur Einstellung gegenüber individuellen und persönlichen Produktvarianten zeichnet ein ähnliches Bild. So weisen 41% der Befragten eine höhere Preisbereitschaft für individualisierte Produkte auf. (siehe Abb. 9) 54% der Befragten finden individuelle Produktvarianten interessanter als gleichwertige Produkte und 40% erwarten von Unternehmen sogar ein größeres Angebot für individuelle Produktvarianten.

Mithilfe dynamischer Prozesse ist es außerdem möglich, schnell auf kurzfristige Ausfälle und Störungen zu reagieren.¹⁰⁹ Dadurch wird die Arbeitsproduktivität erhöht und die Kosten werden gesenkt. Außerdem wird durch die schnelle Reaktion auf bspw. eine Fehlproduktion der Ausschuss minimiert. Die hohe Anpassungsfähigkeit der Produktionseinheiten wird ebenfalls sichtbar, wenn diese untereinander interagierend freie Kapazitäten wahrnehmen und nutzen, auf Staus reagieren und bei Ressourcenknappheit andere Aufträge vorziehen und benötigte Ressourcen anfordern.¹¹⁰

Ebenfalls wirkt sich die gesteigerte Flexibilität positiv auf die Abfallmenge aus. Laut der Studie zu Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 des VDI ist die J. Schmalz GmbH, durch die Integration von Sensorik, Kommunikationstechnik und Software, die zu einer flexiblen Fertigungslinie führen in der Lage, Kundenaufträge in Echtzeit bearbeiten. Dadurch kann das Unternehmen die Überproduktion von Halbzeugen mit kurzer Haltbarkeit verhindern, da die Produktion auf Lager auf ein Minimum abgebaut werden kann. Das Ergebnis ist eine Reduktion der Abfallmenge um bis zu 25%.¹¹¹

Die Netzwerkdarstellung (siehe Abb. 10) zeigt, mit welchen Handlungen die Flexibilität in smarten Produktionsprozessen auf die Kennzahlen der Nachhaltigkeit wirkt.

¹⁰⁹ Vgl. Kagermann 2013, S. 20.

¹¹⁰ Vgl. Kagermann 2014, S. 606 ff.

¹¹¹ Vgl. Schebek et al. 2017, S. 100 ff.

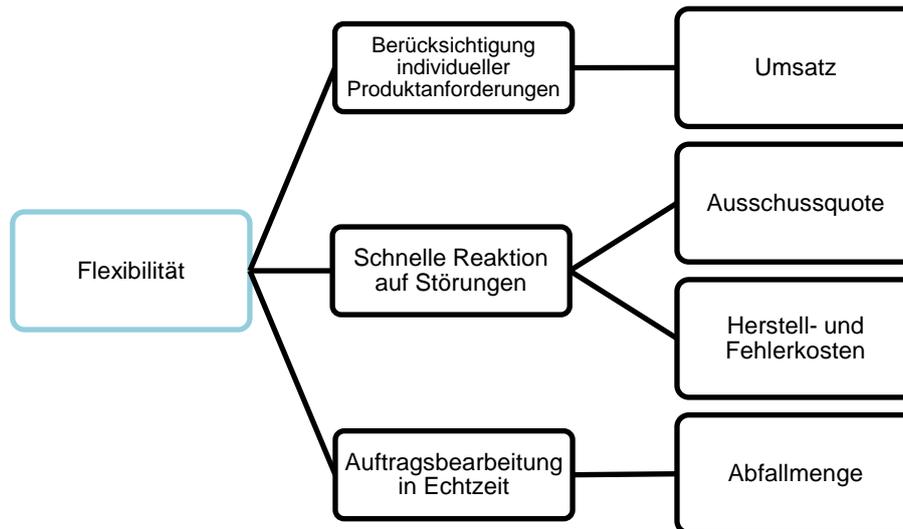


Abbildung 10 Handlungsfelder und Einflussbereiche der Flexibilität auf die Nachhaltigkeit
Quelle: Eigene Darstellung

4.2.3.2. Einfluss der automatisierten Selbststeuerung

Durch echtzeitorientierte, autonome CPS ist die Rolle der Beschäftigten im Wandel. Intelligente Produktionssysteme sind dem Menschen aufgrund ihrer Zuverlässigkeit, Ausdauer und konstanten Qualität in standardisierten Prozessen überlegen.¹¹² Die Intelligenz der Systeme in der Produktion führt zusätzlich dazu, dass die Systeme autonomer arbeiten und der Einsatz des Menschen in der Produktion weiter abnimmt. Daher ändern sich die Aufgaben- und Kompetenzprofile der Mitarbeiter in intelligenten Fabriken stark. Das erfordert in Unternehmen eine Qualifizierungsstrategie, die lebensbegleitendes Lernen und arbeitsplatznahe Weiterbildung ermöglicht.¹¹³ Im Praxisbeispiel der Smart Factory von Festo wurde eine sogenannte Lernfabrik integriert, in der die Weiterbildung durch Schulungen, Prozessqualifizierungen und Pilottrainings in direkter Arbeitsplatznähe realisiert wird.¹¹⁴

Besonders der Einfluss der zunehmenden Automation durch CPS auf die soziale Nachhaltigkeit ist umstritten. So wird die Gefährdung von Arbeitsplätzen und darauf folgende Entlassungen oft als Ursache selbststeuernder Produktionssysteme gesehen. Eine Studie über die Zukunft der Arbeit der OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) berichtet darüber, dass die zunehmende

¹¹² Vgl. Steven 2019, S. 211.

¹¹³ Vgl. Kagermann 2013, S. 6 f.

¹¹⁴ Vgl. Festo AG & Co. KG o.J., S. 26.

Automatisierung durch intelligente Systeme für 14% der Arbeitsplätze eine sehr hohe Gefahr besteht und 32% der Arbeitsplätze sich durch diese Entwicklung stark verändern werden.¹¹⁵ Eine Studie bei der zum Großteil Personen in Führungspositionen der produzierenden Branchen durch das Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation befragt wurden, zeichnet hingegen ein weniger drastisches Bild. Für 96,5% der 661 Studienteilnehmer bleibt die menschliche Arbeit auch in den nächsten fünf Jahren ein wichtiger bis sehr wichtiger Bestandteil der Produktion.¹¹⁶ Betrachtet man den Einfluss der vergangenen industriellen Revolutionen auf die Arbeitsplatzsituation, so sind durch die zunehmende Automatisierung zwar Arbeitsplätze verloren gegangen, jedoch konnten diese weitestgehend durch die Ausweitung des Dienstleistungssektors kompensiert werden.¹¹⁷

Ob die Substitution menschlicher Tätigkeiten für die Arbeitsplatzsituation ein Risiko oder eine Chance darstellt ist zum heutigen Zeitpunkt schwer zu beurteilen. Es kann jedoch sicher davon ausgegangen werden, dass sich die Arbeit als Tätigkeit verändern wird. Gunther Reinhart, Professor der Technischen Universität München weist darauf hin, dass sich die Rolle des Mitarbeiters in der Produktion vom Maschinenbediener ändern wird. Anstelle von körperlichen Tätigkeiten würden zunehmend koordinative und dirigierende Tätigkeiten in den Vordergrund rücken.¹¹⁸ Die Tätigkeiten, die durch autonome Maschinen und Anlagen ersetzt werden, sind in der Regel monoton, körperlich anstrengend und gefährlich. Durch den Wandel des Menschen in der Produktion von der ausführenden hin zur steuernden und kontrollierenden Funktion resultiert eine kooperative Zusammenarbeit mit Maschinen und Leichtbaurobotern, die die Unfallquote in der Produktion senkt.¹¹⁹

Neben dem Einfluss auf die soziale Nachhaltigkeit weist der hoch automatisierte Produktionsprozess durch den umfassenden Einsatz elektronischer Komponenten auch einen Einfluss auf die ökologische Nachhaltigkeit auf. Die technologischen Komponenten fallen wegen ihrer kurzen Nutzungszeit schnell als Abfall an. Problematisch ist nicht nur die dadurch steigende Abfallmenge, sondern auch die nur bedingte Recyclingfähigkeit. Außerdem führt der Energiebedarf der technologischen Komponenten zu

¹¹⁵ Vgl. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) 2019, S. 6 – 10.

¹¹⁶ Vgl. Spath et al. 2013, S. 47.

¹¹⁷ Vgl. Steven 2019, S. 211.

¹¹⁸ Vgl. Spath et al. 2013, S. 49.

¹¹⁹ Vgl. Steven 2019, S. 119.

einem steigenden Stromverbrauch und einer Verschlechterung der Energieeffizienz.¹²⁰ Andererseits können Maschinen und Anlagen mithilfe von Start-Stopp-Funktionen in einer intelligenten Fabrik den Energieverbrauch deutlich reduzieren.¹²¹

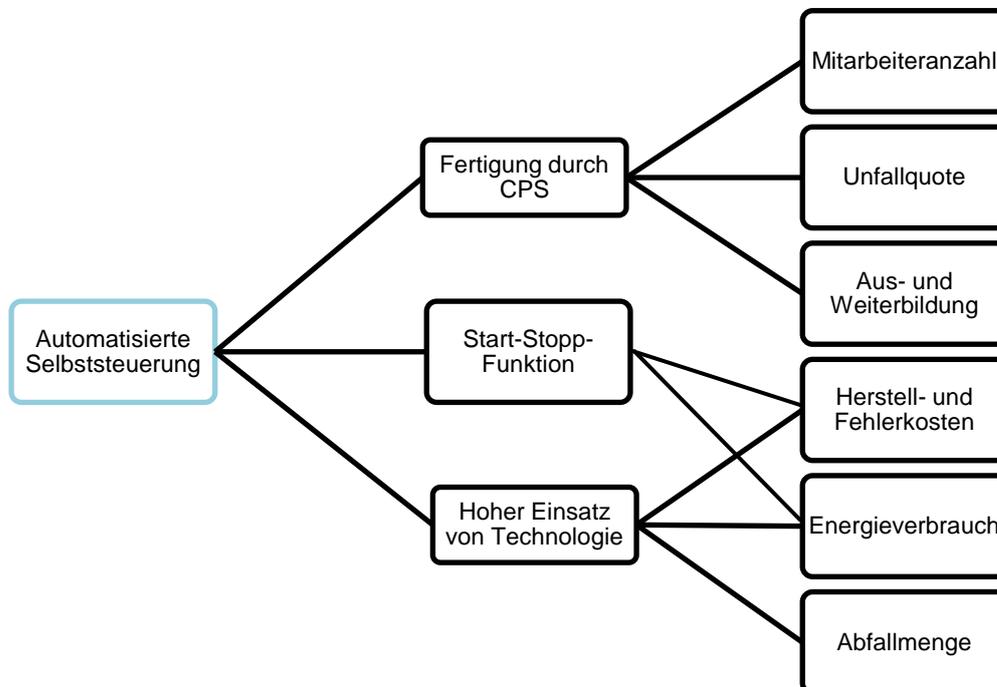


Abbildung 11 Handlungsfelder und Einflussbereiche der Selbststeuerung auf die Nachhaltigkeit
Quelle: Eigene Darstellung

4.2.3.3. Einfluss der Datentransparenz

Die umfassende Erfassung, Validierung und Verarbeitung von Daten in Echtzeit in Produktionsprozessen werden durch den hohen Einsatz an Sensoren und Datenträgern wie RFID-Chips ermöglicht. Über die Vernetzung der Produktion durch internetähnliche Strukturen werden erhobene Daten virtualisiert und ortsunabhängig einsehbar. Henning Kagermann ist der Meinung, dass sich durch die umfassende Datentransparenz Chancen für eine schonendere Ressourcennutzung ergeben können, in dem das virtuelle Abbild des Produktionsprozesses dabei hilft den Ressourcenverbrauch über Benutzerschnittstellen zu optimieren. Darüber hinaus wird durch die Datentransparenz die Resilienz, also die Widerstands- und Regenerationsfähigkeit von Produktionsprozessen, gegenüber Störungen erhöht. Mittels der umfassenden Erhebung von Daten im ganzen Produktionsprozess und deren Auswertung können Störungen frühzeitig erkannt und verhindert bzw. kann auf entstandene Störungen unmittelbar reagiert

¹²⁰ Vgl. Steven 2019, S. 218.

¹²¹ Vgl. Kagermann 2014, S. 608.

werden.¹²² In der Praxis können so kritische Punkte im Fertigungsprozess in Echtzeit überwacht werden. Entwickeln sich die Messwerte in eine negative Richtung kann so frühzeitig eingegriffen werden.¹²³

Auch in einem Diskussionspapier zur zukünftigen Produktionsautomatisierung der „acatech Projektgruppe“, der deutschen Akademie der Technikwissenschaften, wird ein Einfluss Datentransparenz auf die ökologische Dimension der nachhaltigen Entwicklung aufgezeigt. Demnach soll die durch die Produktion entstehende Umweltbelastung und der Ressourcenverbrauch durch eine fortlaufende Optimierung des Energieverbrauchs und der Abgabe von Immissionen möglichst geringgehalten werden.¹²⁴ Durch die Echtzeitübertragung von Bedarfen können Produktionsprozesse optimal aufeinander abgestimmt werden und somit zu einer Steigerung der Ressourcen- und Energieeffizienz führen.

Neben der positiven Einflüsse der Datentransparenz auf die ökologische Nachhaltigkeit hat die Steigerung der Ressourcen- und Energieeffizienz auch positive Auswirkungen auf die ökonomische Dimension, da sich durch optimierte Bedarfsplanung und Verringerung des Ausschusses Kosteneinsparpotenziale ergeben.¹²⁵ Außerdem ist es möglich, den Zustand von Teilen und Werkzeugen zu überwachen und einen Austausch anhand tatsächlichen Bedarfen anstatt an Durchschnittswerten orientierten Planungen zu vollziehen, wodurch der Materialeinsatz reduziert werden kann.¹²⁶

In der Praxis hat die Technologiefabrik Scharnhausen von Festo durch die Datenerhebung in Echtzeit einige Erfolge erzielen können. Die Technologiefabrik ist ein Werk für Ventile, Ventilinseln und Elektronik, die eine Vielzahl von Ansätzen des Smart Factory Modells in den Produktionsalltag eingebettet hat. Hier machen vernetzte und intelligente Energietransparenzsysteme aktuelle Verbrauchswerte in Echtzeit für Mitarbeiter am Tablet oder Smartphone einsehbar, wodurch Energieeinsparpotenziale sichtbar werden. Ergebnis der Echtzeitübertragung und der Vernetzung sind eine Einsparung von Emissionen (jährlich 1.500 Tonnen), niedrigere Energieverbräuche, eine höhere Energieeffizienz und niedrigere Kosten.¹²⁷ Ein weiteres Beispiel aus der Praxis für den

¹²² Vgl. Kagermann 2014, S. 608.

¹²³ Vgl. Noser Engineering AG o.J.

¹²⁴ Vgl. Vogel-Heuser/ Bayrak/ Frank 2012, S. 28.

¹²⁵ Vgl. Möller/ Bogaschewsky 2019, S. 364.

¹²⁶ Vgl. Steven 2019, S. 207.

¹²⁷ Vgl. Festo AG & Co. KG 2019, S. 18 ff.

Einfluss der umfassenden Datenerhebung auf die Nachhaltigkeit liefert das Unternehmen „Henkel“. Henkel hat an einem Produktionsstandort für Flüssigwaschmittel in Kairo den Produktionsprozess getreu der Kriterien der Smart Factory umstrukturiert. Durch die Echtzeitkontrolle des Wasserverbrauchs mithilfe moderner Messsysteme werden zusätzliche Einsparpotenziale ermöglicht, um den Frischwassereinsatz zu reduzieren.¹²⁸

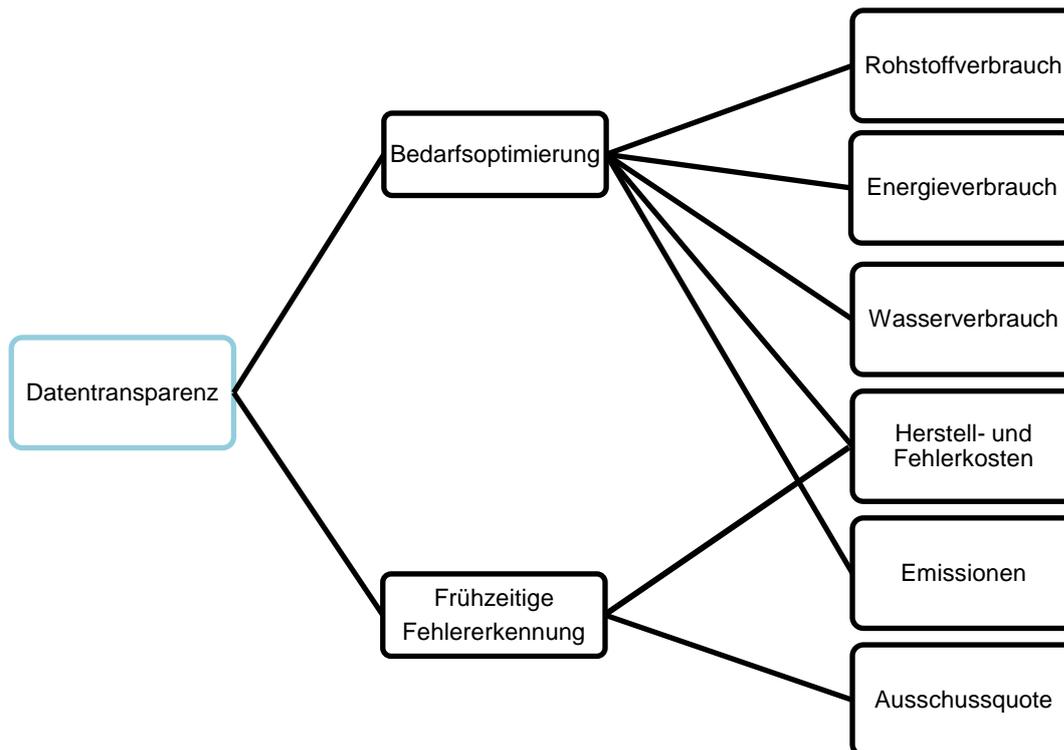


Abbildung 12 Handlungsfelder und Einflussbereiche der Datentransparenz auf die Nachhaltigkeit
Quelle: Eigene Darstellung

4.2.4. Wechselwirkungen zwischen den Merkmalen

Die Merkmale smarter Produktionsprozesse können grundsätzlich eine gegenseitige Beeinflussung aufweisen, die entweder positiv oder negativ sind. Führt eine Verbesserung eines Merkmals ebenfalls zu einer Verbesserung eines anderen, liegt eine Zielharmonie vor. Führt die Verbesserung hingegen zu einer Verschlechterung eines Merkmals wird von einem Zielkonflikt gesprochen.¹²⁹

Eine hohe Flexibilität hängt mit der Fähigkeit der Selbststeuerung der Produktionseinheiten zusammen.¹³⁰ Umso stärker das maschinelle Lernen und eigenständige

¹²⁸ Vgl. Schmorte 2018, S. 66.

¹²⁹ Vgl. Saatweber 2007, S. 219 f.

¹³⁰ Vgl. Thiele/ Meisen/ Jeschke 2019 S. 12.

Arbeiten von CPS ausgeprägt ist, desto befähigter sind die Systeme, eigenständig auf wechselnde Umweltbedingungen zu reagieren. Eine termingerechte Produktion von kundenspezifischen Produkten zu kleinen Losgrößen hängt stark von der Fähigkeit sensorbasierter, automatisierter Produktionsprozesse autonom zu handeln ab.¹³¹ Zwischen Flexibilität und automatisierter Selbststeuerung liegt eine Zielharmonie vor.

Die selbststeuernden CPS erheben permanent Prozessdaten, die zum einen die Voraussetzung zur Selbststeuerung und zum anderen eine wichtige Datenquelle zur Steuerung und Kontrolle der Produktionsabläufe darstellen. Je größer die Datenmenge ist, desto selbständiger wird der Prozess.¹³² Daraus abgeleitet hat eine Verbesserung der Selbststeuerung auch eine höhere Anzahl an Daten zufolge und führt somit zu einer höheren Transparenz des Produktionsprozesses. Daraus lässt sich ein positiver Zusammenhang zwischen der Selbststeuerung und der Datentransparenz schlussfolgern.

Zwischen der Datentransparenz und der Flexibilität konnten keine direkten Wechselwirkungen festgestellt werden. Zwischen den Merkmalen Datentransparenz und Selbststeuerung sowie Flexibilität und Selbststeuerung herrschen positive Wechselwirkungen, die im nächsten Kapitel in das „Dach“ der Matrix eingeordnet werden.

4.2.5. Erstellung der Beziehungsmatrix

In den vorherigen Unterkapiteln wurde mit einer Literaturrecherche verdeutlicht, dass intelligente Produktionsprozesse einen Einfluss auf die Dimensionen der nachhaltigen Entwicklung haben. Im nächsten Schritt werden die Beziehungen zwischen den konkreten Indikatoren der Nachhaltigkeit und den Merkmalen intelligenter Produktionsprozesse in die Beziehungsmatrix eingeordnet, um ein detaillierteres Bild der Einflüsse zu erhalten.

Die Korrelationen unter den Merkmalen eines intelligenten Produktionsprozesses werden mit „+“ positiv, „0“ neutral oder „-“ negativ gekennzeichnet.

In der Regel erhalten die Beziehungen zwischen den Anforderungen und der Merkmale in einer Beziehungsmatrix Werte, die erkennen lassen, ob die Beziehungen stark, mittel oder schwach sind. Starke Beziehungen erhalten den Wert „9“, Mäßige den Wert

¹³¹ Vgl. Steven 2019, S. 116.

¹³² Vgl. SAP o.J.

„3“ und mögliche Beziehungen den Wert „1“.¹³³ Eine qualifizierte Bewertung der Beziehungen mit den Werten stark, mäßig und möglich ist allerdings allein durch die Literaturrecherche nicht möglich, da es keine Bewertungsgrundlage gibt, auf der eine Beziehung als stark oder schwach eingestuft werden kann.

Sowohl die ermittelten Beziehungen aus der Literatur als auch die konkreten Daten aus Praxisbeispielen geben keine Aufschlüsse über die Stärke der Beziehungen. Grund dafür ist die starke Abhängigkeit der Daten von vielen individuellen Faktoren in den Unternehmen, wie bspw. Größe, Branche, Produktart, Output. Daher wird eine Beziehung zwischen einer Anforderung und einem Merkmal unabhängig von der Stärke der Beziehung mit dem Wert 3 oder -3 bewertet, wenn eine positive oder negative Beziehung festgestellt wurde. Zeigt ein Merkmal sowohl positive als auch negative Beziehungen zu einem Merkmal, gleichen diese sich aus, werden allerdings trotzdem in der Matrix gekennzeichnet, in dem beide Werte aufgenommen werden, um kenntlich zu machen, dass Beziehungen zwischen Merkmal und Anforderung vorliegen.

In der Beziehungsmatrix (siehe Tab. 5) werden die Einflüsse der Merkmale smarterer Produktionsprozesse auf die Anforderungen der nachhaltigen Entwicklung deutlich. Die Anforderungen sind in den Dimensionen der Nachhaltigkeit gruppiert.

¹³³ Vgl. Saatweber 2007, S. 69.

		Merkmale von smarten Produktionsprozessen		
		Datentransparenz	Flexibilität	Automatisierte Selbststeuerung
Ökonomisch	Einsparung von Herstell- und Fehlerkosten	3	3	3; -3
	Umsatzsteigerung		3	
	Verringerung der Ausschussquote	3	3	
Ökologisch	Reduktion Rohstoffverbrauch	3		
	Reduktion Energieverbrauch	3		3; -3
	Reduktion Wasserverbrauch	3		
	Reduktion Abfallmenge		3	-3
	Reduktion Emissionen in Luft und Wasser	3		
Sozial	Vermeidung von Entlassungen			3; -3
	Verringerung der Unfallquote			3
	Steigerung der Aus- und Weiterbildung			3
Summe		18	12	15; -12

Tabelle 5 Beziehungsmatrix
Quelle: Eigene Darstellung

Es ist zunächst festzustellen, dass alle drei Merkmale Beziehungen zu bestimmten Anforderungen aufweisen und somit ein Einfluss durch die Implementierung des Smart Factory Ansatzes auf die Nachhaltigkeit von Produktionsprozessen gegeben ist. Hierbei fällt jedoch auf, dass die Merkmale in unterschiedlicher Weise auf die Dimensionen wirken.

4.2.6. Bedeutung der Merkmale für die Erfüllung der Anforderungen

Betrachtet man die Datentransparenz in smarten Produktionsprozessen, so fällt auf, dass diese mit sechs Beziehungen, die meisten positiven Beziehungen aufweist und einen großen Einfluss auf die Nachhaltigkeit insbesondere auf die ökologische Dimension hat. Folgend aus der Reduktion des Ressourcenverbrauchs und der Steigerung der Ressourcen- und Energieeffizienz zeigt sich die Beziehung der Datentransparenz mit der ökonomischen hauptsächlich durch Kosteneinsparpotenzialen.

In der Literatur konnte kein signifikanter Einfluss auf die Anforderungen der sozialen Nachhaltigkeit festgestellt werden. Grundsätzlich trägt ein virtuelles Abbild der Produktion zur Steuerung und Optimierung dazu bei, die Anforderungen der Nachhaltigkeit, zu denen Beziehungen bestehen, zu erfüllen.

Ebenso positiv wirkt sich eine ausgeprägte Flexibilität in smarten Produktionsprozessen mit vier positiven Beziehungen auf die Nachhaltigkeit aus. Insbesondere die Anforderungen der ökonomischen Nachhaltigkeit werden im Ganzen erfüllt.

Die Möglichkeit, dass sehr anpassungsfähige Systeme in einem dynamischen Produktionsumfeld individuelle Produktwünsche berücksichtigen können, bietet Potenziale zur Umsatzsteigerung. Die Vermeidung von Überproduktion und die schnelle Reaktion Störungen, Ausfällen und Produktionsstaus sorgen für eine Steigerung der Arbeitsproduktivität, einer Reduktion der Kosten und der Abfallmenge.

Die automatisierte Selbststeuerung des Produktionsprozesses weist mit sechs Beziehungen ebenso viele Beziehungen mit den Anforderungen nachhaltiger Entwicklung wie die Datentransparenz auf, hat aber dennoch den kleinsten positiven Einfluss auf die Nachhaltigkeit, da sich hier negative Einflüsse auf die Nachhaltigkeit zeigen, die in den positiven Effekt neutralisieren.

Den größten Einfluss hat die Selbststeuerung auf die soziale Dimension. Durch autonom arbeitende CPS nimmt die Unfallquote ab und das Weiterbildungsangebot in Form von Schulungen und arbeitsplatznahe Lernen im Unternehmen nimmt durch die steigende Komplexität der Arbeit und dem Wandel der Tätigkeiten zu. Der Einfluss zunehmender Automatisierung auf die Mitarbeiteranzahl ist in der Literatur wie beschrieben sehr umstritten, sodass zum heutigen Zeitpunkt noch keine abschließende Beurteilung der Beziehung möglich ist.

Der hohe Einsatz von kurzlebiger Technologie, wie RFID-Chips an Werkstücken, führt außerdem durch größere Abfallmengen von schwer recyclebaren Komponenten zu

einem negativen Einfluss auf die ökologische Nachhaltigkeit. Die eingesetzte Soft- und Hardware erfordert in der Regel Strom, durch den der Energieverbrauch gesteigert wird. Dieser wird allerdings durch automatische Start-Stopp Funktionen reduziert, weswegen der Einfluss auf den Energieverbrauch neutral zu beurteilen ist.

Es lässt sich festhalten, dass die nachhaltige Entwicklung in Produktionsprozessen durch das Smart Factory Modell beeinflusst wird. Für die ökologische Dimension ist die Datentransparenz von wichtiger Rolle. Die Flexibilität weist vor allem positive Beziehungen mit der ökonomischen Nachhaltigkeit auf und die automatisierte Selbststeuerung der CPS wirkt sich vorwiegend auf die soziale Dimension aus.

Schlussfolgernd aus dem positiven Einfluss aller Merkmale lässt sich festhalten, dass auch Unternehmen, die hohe Losgrößen mit wenigen Varianten produzieren und keine Steigerung der Flexibilität abzielen, die Möglichkeit besteht durch die Datentransparenz und zunehmende Automatisierung die Nachhaltigkeit in der Produktion zu fördern. Der Einfluss auf die ökologische und ökonomische Dimension der Nachhaltigkeit ist als weitestgehend positiv zu bewerten. Wie sich die soziale Nachhaltigkeit in intelligenten Fabriken entwickelt, bleibt allerdings abzuwarten.

Eine wichtige Rolle für die Ausgestaltung nachhaltiger Produktionsprozesse hat vor allem die Unternehmensführung. Eine nachhaltige Unternehmenskultur und -ausrichtung kann die positiven Beziehungen zwischen dem Smart Factory Modell und der Nachhaltigkeit in Produktionsprozessen begünstigen.

Die Methodik gibt in dieser Form allerdings keine Hinweise über die Stärke der Beziehungen. Unternehmen können über Dokumentation der Kennzahlen Veränderungen durch smarte Produktionsprozesse analysieren, bewerten und mit der Beziehungsmatrix ein konkreteres, individuelles Abbild des Einflusses auf die Nachhaltigkeit erhalten.

5. Herausforderungen für die Nachhaltigkeit

Bisher wurden die Beziehungen zwischen den Merkmalen smarter Produktionsprozesse und den Anforderungen der Nachhaltigkeit untersucht. Um ein ganzheitlicheres Bild des Einflusses zu erzeugen sollen in diesem Kapitel zwei grundlegende Herausforderungen erläutert werden, die durch die Transformation hin zur Smart Factory, unabhängig von den Merkmalen smarter Produktionsprozesse, eine Herausforderung für eine nachhaltige Entwicklung darstellen.

5.1. Datensicherheit

Aus der voranstehenden Analyse in Kapitel 4 geht hervor, dass insbesondere die umfangreiche Erhebung, Auswertung und Verfügbarkeit von Daten in der Produktion intelligenter Fabriken wesentlichen Faktor für den Einfluss auf die ökologische Nachhaltigkeit darstellt. Ohne die große Menge an Daten wäre wohl keine intelligente Fabrik umsetzbar.

Die Datenmengen bringen neben Potenzialen aber auch ein großes Risiko mit sich, da die virtuellen, sensiblen Unternehmens- und Kundendaten, die über das Internet der Dinge und Dienste im gesamten Produktionsprozess und Unternehmen ausgetauscht werden, eine Angriffsfläche für Industriespionage, Datendiebstahl und Hackerangriffen darstellen. Effektive Datensicherheitssystemen und offizielle Sicherheitsstandards sind erforderlich um genannten Gefahren entgegenzuwirken.¹³⁴ Ein weiteres Szenario, dass durch unzureichend geschützte Daten hervorgerufen wird, ist die Manipulation der Produktion, dessen Ausprägungen über Verursachung von Sachschäden, Erpressung bis terroristischen Handlungen reichen kann. Fehlproduktionen führen neben kostenintensiven Rückrufaktionen auch zu großen Imageverlusten des Unternehmens, dessen Schaden oft schwerwiegender sind als ein Schaden, der bspw. durch Informationsdiebstahl entsteht.¹³⁵ Solche Angriffe implizieren negative Folgen für die Nachhaltigkeit in verschiedenen Konstellationen, die sich in der Regel durch ökonomische Schäden zeigen. Anfallende Kosten durch Rückrufaktionen, langfristige Umsatzeinbußen durch Imageschäden, oder das Verlieren von Wettbewerbsvorteilen durch Industriespionage können ökonomische Ausmaße sein.

Mangelnde Datensicherheit könnten aber auch weitreichende, negative Einflüsse auf die soziale und ökologische Dimension haben, wenn es zum Beispiel um den Verlust von sensiblen Kundendaten, die Produktsicherheit durch Manipulation der Produktion oder Manipulationen zu Unfällen mit umweltschädlichen Folgen geht.

Schon heute ist das Thema der Datensicherheit ein Thema, das die Industrie intensiv beschäftigt. So zeigt eine Umfrage zum Auftreten von Computerkriminalität, dass 68% aller befragten Unternehmen im industriellen Sektor zwischen 2016 und 2018 von Datendiebstahl, Industriespionage oder Sabotage betroffen waren.¹³⁶ Mit der zunehmenden Umstrukturierung hin zu Smart Factory und steigenden der Relevanz von Daten

¹³⁴ Vgl. Deloitte AG 2015, S. 12.

¹³⁵ Vgl. Rosche 2015.

¹³⁶ Vgl. Bitkom Research 2018.

ist es denkbar, dass das Thema Datensicherheit in Zukunft noch wichtiger werden könnte.

Feststeht, dass die Umsetzung einer Smart Factory neue Anforderungen an die Datensicherheit stellt.¹³⁷ Es müssen von Beginn der Planung Sicherheitsarchitekturen geschaffen werden, die in Echtzeit Verhaltensauffälligkeiten erkennen und auf diese reagieren können. Zusätzlich muss in den Unternehmen der Umgang mit technologischen, internetfähigen Komponenten und deren Sicherheitsmechanismen bei der Belegschaft Akzeptanz finden und Bestandteil der Unternehmenskultur werden.¹³⁸

5.2. Abbau von Rohstoffen

Den Einsparpotentialen zur Ressourcenschonung, die sich in laufenden Produktionsprozessen durch die Umstrukturierung zur intelligenten Fabrik ergeben, stehen erhebliche Mehraufwände an Ressourcen bei der Umsetzung von Industrie 4.0 gegenüber.¹³⁹ Alle an der Produktion beteiligten Fertigungssysteme müssen mit smarterer Sensorik, Aktoren, Prozessoren und Kommunikationstechnik nachgerüstet oder durch moderne Systeme komplett ausgetauscht werden.¹⁴⁰ Neben der ökonomischen Herausforderung der Nachrüstung durch die anfallenden Kosten ist auch der Abbau der Rohstoffe für die genannten Technologien aus ökologischer und sozialer Sicht kritisch zu betrachten. Für die Herstellung der hohen Anzahl an Sensoren, Leichtbaurobotern und RFID Chips, die in smarten Produktionsprozessen zum Einsatz kommen, werden eine Menge an spezifischen Rohstoffen benötigt, dessen Abbau zu Umweltbelastungen führt.¹⁴¹

Am Beispiel der Sensoren sollen die Auswirkungen des Rohstoffabbaus auf die Umwelt und Gesellschaft verdeutlicht werden. Für die vielen verschiedene Arten an Sensoren werden für die Herstellung je nach Messprinzip verschiedene Rohstoffe und Materialien verwendet.¹⁴² Häufig werden in Sensoren Metalle wie Zinn, Platin, Tantal und Wolfram eingesetzt, von denen Tantal und Wolfram zu den kritischen Rohstoffen gehören.¹⁴³ Kritische Rohstoffe sind Rohstoffe, die von hoher ökonomischer

¹³⁷ Vgl. Zillmann/ Wilk 2016, S. 42.

¹³⁸ Vgl. Kagermann 2014, S. 610 f.

¹³⁹ Vgl. Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (BDI) 2016.

¹⁴⁰ Vgl. Beier et al. 2019.

¹⁴¹ Vgl. Steven 2019, S. 208.

¹⁴² Vgl. Marscheider-Weidemann et al. 2016, S. 233.

¹⁴³ Vgl. Pilgrim/ Groneweg/ Reckordt 2017, S. 12.

Bedeutung sind, zu denen aber kein freier und fairer Zugang auf dem Weltmarkt vorhanden ist sowie keine dauerhafte Versorgung aus Rohstoffquellen in Europa gegeben ist. Außerdem weisen die Rohstoffe keine bis sehr geringe Substituierbarkeit und Recyclingmöglichkeit auf.¹⁴⁴

In den Abbauregionen kommt es bei der Gewinnung der Rohstoffe nicht selten zu unwiderruflichen Veränderungen der Natur mit schweren Folgen für Mensch und Tier. Bei dem kritischen Rohstoff Tantal kommt es durch die Freisetzung von Schwermetallen und Giften in die Böden, Gewässer und Luft zu Umweltbelastungen in den Abbauregionen in Ruanda, Brasilien und der Demokratischen Republik Kongo.¹⁴⁵ Ein weiteres Beispiel der hohen Umweltbelastung zeigt der Abbau von Zinnerz in Indonesien, der einen hohen Flächenverbrauch bedarf, weswegen es dort zu großflächigen Rodungen, Bodendegradation und Gewässerverschmutzungen mit zerstörenden Folgen für die regionale Biodiversität kommt.¹⁴⁶



Abbildung 13 Zinnabbau auf der indonesischen Insel Bangka
Quelle: SWR 2015

Darüber hinaus wird Tantal, aber auch Wolfram, als Mineral aus Konfliktgebieten deklariert, da der Handel bspw. in der Demokratischen Republik Kongo zur Finanzierung bewaffneter Gruppierung führt.¹⁴⁷ In solchen Abbaugebieten arbeiten die Menschen oft in prekären Arbeitsverhältnissen, unter schlechten Sicherheitsvoraussetzungen.¹⁴⁸

Die Beispiele aus der Gewinnung nötiger Rohstoffe für Sensoren zeigt, welche Belastungen für Umwelt und Gesellschaft durch den Abbau entstehen können. Darüber hinaus werden für die technologischen Komponenten, die im Rahmen der Smart Factory eingesetzt werden, weitaus mehr Rohstoffe benötigt, zu denen einige kritische Rohstoffe gehören. Mit der zunehmenden Umstrukturierung hin zur intelligenten Fabrik in der Industrie ist davon auszugehen, dass der globale Bedarf an den benötigten Komponenten und folglich auch der Bedarf an den Rohstoffen steigen wird.

¹⁴⁴ Vgl. Kolroser 2017, S. 1.

¹⁴⁵ Vgl. Pilgrim/ Groneweg/ Reckordt 2017, S. 33.

¹⁴⁶ Vgl. Pilgrim/ Groneweg/ Reckordt. 2017, S. 36.

¹⁴⁷ Vgl. Europäische Kommission 2017, S. 7.

¹⁴⁸ Vgl. Meretz/ Mannigel 2017, S. 9.

6. Fazit und Ausblick

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, mittels einer Literaturrecherche und Beziehungsmatrix herauszufinden, ob das Smart Factory Konzept einen positiven Einfluss auf die Nachhaltigkeit von Produktionsprozessen hervorrufen kann.

Die Grundlage für die Analyse liefern die ersten Abschnitte der Arbeit, durch die festgestellt werden konnte, dass sich die Produktionsprozesse in Smart Factories grundlegend verändern und neue Merkmale aufzeigen, die den Prozess von konventionellen Produktionsprozessen unterscheidbar macht. Außerdem wurden die wesentlichen Kennzahlen der Nachhaltigkeit, untergliedert in die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit, für Produktionsprozesse identifiziert und in konkrete Anforderungen formuliert.

Die darauffolgende Literaturrecherche hat ergeben, dass alle Merkmale eine Beziehung zu mindestens einer Anforderung jeder Dimension der Nachhaltigkeit aufweisen. Die Datentransparenz und die Flexibilität tragen zu einer nachhaltigen Entwicklung bei, wohingegen die Selbststeuerung einige negative Beziehungen aufzeigt. Insbesondere die Substitution der menschlichen Arbeit bleibt eine ungeklärte Debatte, die zum heutigen Zeitpunkt nicht abschließend bewertet werden kann. Die Stärke der Beziehungen und des Einflusses lässt sich in diesem Rahmen nicht beurteilen, da die Belege aus der Literatur und Praxis keine Bewertung erlauben. In der Praxis gibt es bisher nur wenige Fertigungsstätten, die die Prozesse im Sinne der Smart Factory ganzheitlich eingeführt haben, aber immer mehr Unternehmen, die einzelne Prozesse bereits umstrukturiert haben oder eine Umstrukturierung planen. Daher steht fest, dass das Ergebnis mögliche positive Einflüsse durch die Merkmale eines intelligenten Produktionsprozesses aufzeigt, dessen Stärke sehr von der Unternehmensführung, der Nachhaltigkeitsstrategie und der Ausgestaltung des individuellen Produktionsprozesses in einem Unternehmen abhängig ist.

Die Analyse zeigt auf, dass der Einfluss trotz negativer Effekte durch die Selbststeuerung und ungeklärter Frage bei der Arbeitssituation als eher positiv einzustufen ist und somit die Produktion in intelligenten Fabriken durch digitale Technologien nachhaltiger gestaltet werden kann. Dem stehen allerdings erhebliche Herausforderungen bei der Umstrukturierung der Produktion gegenüber. Insbesondere der Rohstoffabbau stellt für ökologische und soziale Nachhaltigkeit ein großes Problem dar, das es in naher Zukunft zu lösen gilt, da davon auszugehen ist, dass die negativen Auswirkungen mit dem drastisch steigenden Rohstoffbedarf zunehmen werden.

Zukünftig wird sich auch zeigen, wie mit der Arbeitsplatzsituation umgegangen wird. Können nicht alle substituierten Arbeitnehmer umgeschult oder in anderen Tätigkeiten integriert werden liegt es an den Unternehmen und der Politik diese Menschen nicht zurück zu lassen. Die Entlastung der menschlichen Arbeit durch intelligente autonome Maschinen könnte dabei Debatten über neue Arbeits- und Einkommensmodelle, wie niedrigere Stundenzahlen pro Woche oder ein bedingungsloses Grundeinkommen anregen.

Letztendlich lässt sich festhalten, dass es Möglichkeiten gibt Produktionsprozesse durch das Smart Factory Modell nachhaltiger gestalten zu können. Den bestehenden Potenzialen im Produktionsprozess stehen allerdings große Herausforderungen gegenüber, dessen Lösungen darüber entscheiden, ob intelligente Fabriken auch im Ganzen einen positiven Einfluss auf die nachhaltige Entwicklung haben.

Literaturverzeichnis

- Akao, Yoji: QFD - Quality Function Deployment. Wie die Japaner Kundenwünsche in Qualitätsprodukte umsetzen, übersetzt von Günter Liesegang, Landsberg (Verlag Moderne Industrie), 1992.
- Bartol, Arne; Herkommer, Erwin: Der aktuelle Begriff. Nachhaltigkeit, in Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages (2004) Nr. 6, <https://www.bundestag.de/resource/blob/194082/f326b04552483bbb9efad8b0fb0696d2/nachhaltigkeit-data.pdf> (24. Mai 2019).
- Bauernhansl, Thomas: Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma, in: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration (Hrsg.: Bauernhansl, Thomas; Ten Hompel, Michael; Vogel-Heuser, Birgit), Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014.
- Beier, Grischa; Niehoff, Silke; Renn, Ortwin „Industrie 4.0 – Effizienzwunder oder Ressourcenschleuder?“, 2019, <https://www.iass-potsdam.de/de/blog/2019/22/industrie-40-effizienzwunder-oder-ressourcenschleuder> (26. Jun. 2019).
- Bitkom: Umfrage zum Auftreten von Computerkriminalität in Deutschland nach Branchen 2018, 2018, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/164303/umfrage/computerkriminalitaet-nach-branche-in-deutschland/> (26. Jun. 2019).
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.); Projektträger Karlsruhe: Industrie 4.0 - Innovationen für die Produktion von morgen, 2017, https://www.bmbf.de/upload_filestore/pub/Industrie_4.0.pdf (06. Jun. 2019).
- Bundesministerium für Bildung und Forschung: Industrie 4.0, o.J., <https://www.bmbf.de/de/zukunftsprojekt-industrie-4-0-848.html> (04. Jun. 2019).
- Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (BDI): Ohne Rohstoffe keine Industrie 4.0, 2016, <https://bdi.eu/artikel/news/ohne-rohstoffe-keine-industrie-40/> (25. Jun. 2019).
- Capgemini: Haben Sie in Ihrem Unternehmen bereits Prozesse im Bereich der intelligenten Fabrik eingeführt? (Anteil der Ja-Stimmen nach Ländern), 2017, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/721642/umfrage/einfuehrung-von-prozessen-im-bereich-intelligente-fabrik-weltweit-nach-laendern/> (12. Jun. 2019).
- Deloitte AG: Werkplatz 4.0. Herausforderungen und Lösungsansätze zur digitalen Transformation und Nutzung exponentieller Technologien, 2015, <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ch/Documents/manufacturing/ch-de-manufacturing-werkplatz-4-0-24102014.pdf> (04. Jul. 2019).
- Döbel, Inga et al.: Maschinelles Lernen. Eine Analyse zu Kompetenzen, Forschung und Anwendung, München (Fraunhofer-Gesellschaft), 2018.

- Dudenredaktion: „Merkmal“ auf Duden online, o.J.,
<https://www.duden.de/rechtschreibung/Merkmal> (29. Mai 2019).
- Empacher, Claudia; Wehling, Peter: Soziale Dimensionen der Nachhaltigkeit. Theoretische Grundlagen und Indikatoren, Frankfurt am Main (Institut für sozial-ökologische Forschung GmbH), 2002.
- Europäische Kommission: Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Über die Liste kritischer Rohstoffe für die EU 2017, 2017, <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2017/DE/COM-2017-490-F1-DE-MAIN-PART-1.PDF> (28. Jun. 2019).
- Festo AG & Co. KG: Technologiefabrik Scharnhausen, o. J.,
https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/378242/Festo_Technologiefabrik_Scharnhausen_de.pdf (12. Jun. 2019).
- Geisberger, Eva; Broy, Manfred (Hrsg.): agendaCPS. Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems. acatech STUDIE, 2012, https://www.bmbf.de/files/acatech_STUDIE_agendaCPS_Web_20120312_superfinal.pdf (22. Mai 2019).
- Gerbert, Philipp et al.: Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries, 2015, https://www.bcg.com/de-de/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries.aspx (09. Jun. 2019).
- Global Reporting Initiative (GRI): About GRI, o.J.,
<https://www.globalreporting.org/information/about-gri/Pages/default.aspx> (04. Jun. 2019).
- Global Reporting Initiative (GRI): GRI 201: ECONOMIC PERFORMANCE 2016, Amsterdam (Global Reporting Initiative.), 2018.
- Hänisch, Till: Grundlagen Industrie 4.0, in: Industrie 4.0: Wie cyber-physische Systeme die Arbeitswelt verändern (Hrsg.: Andelfinger, Volker/ Hänisch, Till), Wiesbaden (Springer Gabler), 2017.
- Hardtke, Arnd; Prehn, Marco (Hrsg.): Perspektiven der Nachhaltigkeit: vom Leitbild zur Erfolgsstrategie, Wiesbaden (Gabler), 1. Auflage, 2001.
- Hauff, Michael von: Nachhaltige Entwicklung - Grundlagen und Umsetzung, München (Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH), 2. Auflage, 2014.
- Hermann, Mario; Pentek, Tobias; Otto, Boris: Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios, Working Paper, Technische Universität Dortmund, 2015.
- Hillebrand, Bernhard et al.: Nachhaltige Entwicklung in Deutschland: ausgewählte Problemfelder und Lösungsansätze, in: Untersuchungen des Rheinisch-Westfälischen Instituts für Wirtschaftsforschung, Heft 36, Essen (RWI), 2000.

- Huber, Walter: Industrie 4.0 kompakt – Wie Technologien unsere Wirtschaft und unsere Unternehmen verändern, Wiesbaden (Springer Vieweg), 2018.
- Hüther, Michael: Angemessenes Wachstum: zu den umweltpolitischen Überlegungen des Sachverständigenrates zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung, in: Zeitschrift für angewandte Umweltforschung 12 (1999) Nr. 1, S.16-21.
- Jonsson, Patrik: Logistics and supply chain management, London (McGraw-Hill), 2008.
- Kagermann, Henning: Chancen von Industrie 4.0 nutzen, in: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration (Hrsg.: Bauernhansl, Thomas; Ten Hompel, Michael; Vogel-Heuser, Birgit), Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014.
- Kagermann, Henning (Hrsg.) et al.: Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern. Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0, 2013, https://www.bmbf.de/files/Umsetzungsempfehlungen_Industrie4_0.pdf (24. Mai 2019).
- Karl, David; Zitzmann, Immanuel: Smart und Sustainable? – Industrie 4.0 aus der Perspektive der Nachhaltigkeit, in: Mobility in a globalised world 2016 (Hrsg.: Sucky, Eric; Werner, Jan; Kolke, Reinhard; Biethahn, Niels; Koch, Günther), Bamberg (OPUS), 2018.
- Kleine, Alexandro (Hrsg.): Operationalisierung einer Nachhaltigkeitsstrategie: Ökologie, Ökonomie und Soziales integrieren, Wiesbaden (Springer Gabler), 1. Auflage, 2009.
- Kolroser, Verena: Neue Liste der kritischen Rohstoffe der EU und Implikationen für die Wirtschaft, Wien (Wirtschaftskammer Österreich, Stabsabteilung Wirtschaftspolitik), 2017.
- Kropp, Ariane: Grundlagen der Nachhaltigen Entwicklung. Handlungsmöglichkeiten und Strategien zur Umsetzung, Wiesbaden (Springer Gabler), 2019.
- Lexikon der Nachhaltigkeit: Nachhaltigkeit Definition, 2015, https://www.nachhaltigkeit.info/artikel/definitionen_1382.htm (02. Jun. 2019).
- Luber, Stefan; Litzel, Nico: Was ist ein Cyber-physisches System (CPS)?, <https://www.bigdata-insider.de/was-ist-ein-cyber-physisches-system-cps-a-668494/> (10. Mai 2019).
- Lucke, Dominik et al.: Strukturstudie. Industrie 4.0 für Baden-Württemberg. Baden-Württemberg auf dem Weg zu Industrie 4.0, Stuttgart (Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA/ Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg), 2014.

- LZ: Umfrage zur Individualisierung und Personalisierung von Produkten in Deutschland im Jahr 2017, 2017, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/961243/umfrage/einstellung-zu-individuellen-und-persoentlichen-produktvarianten-in-deutschland/> (16. Jun. 2019).
- Malanowski, Norbert; Brandt, Jan Christopher: Innovations- und Effizienzsprünge in der chemischen Industrie? Wirkungen und Herausforderungen von Industrie 4.0 und Co., Düsseldorf (VDI Technologiezentrum GmbH), 2014.
- Marscheider-Weidemann, Frank et al.: Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016. - DERA Rohstoffinformationen 28, Berlin (Deutsche Rohstoffagentur), 2016.
- Mayer, Felix; Pantförder, Dorothea: Unterstützung des Menschen in Cyber-Physical-Production-Systems, in: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration (Hrsg.: Bauernhansl, Thomas; Ten Hompel, Michael; Vogel-Heuser, Birgit), Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014.
- Mayer, Katja (Hrsg.): Nachhaltigkeit: 111 Fragen und Antworten. Nachschlagewerk zur Umsetzung von CSR im Unternehmen, Wiesbaden (Springer Gabler), 2017.
- Meretz, Sarah; Mannigel, Elke: Bodenschätze. Rohstoffe und ihre negativen Auswirkungen auf den Regenwald, Bonn (OroVerde - Die Tropenwaldstiftung), 2017.
- Möller, Jasmin; Bogaschewsky, Ronald: Digitale Trends und ihre Auswirkungen auf die Nachhaltigkeitsperformance in der Beschaffung, in: Nachhaltiges Beschaffungsmanagement (Hrsg.: Wellbrock, Wanja; Ludin, Daniela), Wiesbaden (Springer), 2019.
- Niggemann, Oliver; Jasperneite, Jürgen; Vodencarevic, Asmir: Konzepte und Anwendungsfälle für die intelligente Fabrik, in: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration (Hrsg.: Bauernhansl, Thomas; Ten Hompel, Michael; Vogel-Heuser, Birgit), Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014.
- Noser Engineering AG: Dank Überwachung weniger Ausfallzeiten, o.J., <https://www.noser.com/trends/industrie-4-0-smart-factory/ueberwachen/> (16. Jun. 2019).
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD): OECD-Beschäftigungsausblick 2019. Die Zukunft der Arbeit, Paris (OECD Publishing), 2019.
- Plattform Industrie 4.0: Hintergrund zur Plattform Industrie 4.0, o.J. a, <https://www.plattform-i40.de/PI40/Navigation/DE/Plattform/Hintergrund/hintergrund.html> (12. Apr. 2019).
- Plattform Industrie 4.0: Was ist Industrie 4.0?, o.J. b, <https://www.plattform-i40.de/PI40/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html> (11. Apr. 2019).

- Pilgrim, Hannah; Groneweg, Merle; Reckordt, Michael: Ressourcenfluch 4.0. Die sozialen und ökologischen Auswirkungen von Industrie 4.0 auf den Rohstoffsektor, Berlin (PowerShift e.V.), 2017.
- Pötter, Thorsten; Folmer, Jens; Vogel-Heuser, Birgit: Enabling Industrie 4.0 - Chancen und Nutzen für die Prozessindustrie, in: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration (Hrsg.: Bauernhansl, Thomas; Ten Hompel, Michael; Vogel-Heuser, Birgit), Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014.
- Pufé, Iris (Hrsg.): Nachhaltigkeit, Konstanz, München (UVK Verlagsgesellschaft mbH mit UVK/Lucius), 2. Auflage, 2014.
- Rabl, Michael: Quality Function Deployment, in: Praxisorientiertes Innovations- und Produktmanagement (Hrsg.: Gaubinger, Kurt; Werani, Thomas, Rabl, Michael), Wiesbaden (Gabler), 2009.
- Rosche, Matthias: Smart Factory: Herausforderungen im Rahmen der Industrie 4.0, 2015, <https://www.computerweekly.com/de/meinung/Smart-Factory-Herausforderungen-im-Rahmen-der-Industrie-40> (28. Jun. 2019).
- Saatweber, Jutta: Kundenorientierung durch Quality Function Deployment: systematisches Entwickeln von Produkten und Dienstleistungen, Düsseldorf (Symposium), 2. Auflage, 2007.
- SAP: Was ist maschinelles Lernen?, o.J., <https://www.sap.com/austria/products/leonardo/machine-learning/what-is-machine-learning.html> (22. Jun. 2019).
- Schebek, Liselotte et al.: Studie: Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes, Berlin (VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH), 2017.
- Schmorte, Stefan: Der Durst der Welt, in: Jahrbuch Nachhaltigkeit 2018. Nachhaltig wirtschaften. Einführung. Themen. Beispiele (Hrsg.: Walhalla Fachredaktion), Regensburg (Walhalla Fachverlag), 2018.
- Scholz-Reiter, Bernd; Sowade, Steffen: Wandlungsfähigkeit durch selbststeuernde Produktionssysteme, in: Industrie Management (Hrsg.: Gronau, Norbert), 27 (2011) Nr. 3, S. 9 - 12.
- Senghaas-Knobloch, Eva: „Soziale Nachhaltigkeit“ – Konzeptionelle Perspektiven, in: Zukunftsforschung und Zukunftsgestaltung (Hrsg.: Popp, Reinhold; Schüll, Elmar), Berlin, Heidelberg (Springer), 2009.
- Shrouf, Fadi; Ordieres, J.; Miragliotta, Giovanni: Smart Factories in Industry 4.0: A Review of the Concept and of Energy Management Approached in Production Based on the Internet of Things Paradigm, in: 2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management.: 9-12 December 2014, Malaysia (Hrsg.: IEEE Malaysia Section, IEEE TMC Malaysia Chapter, IEEE TMC Hong Kong Chapter), Piscataway (IEEE), 2014.

- SmartFactory KL e.V.: Industrie 4.0 Demonstration, o.J.,
<https://smartfactory.de/industrie-4-0-demonstration/> (21. Mai 2019).
- Soder, Johann: Use Case Production: Von CIM über Lean Production zu Industrie 4.0, in: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration (Hrsg.: Bauernhansl, Thomas; Ten Hompel, Michael; Vogel-Heuser, Birgit), Wiesbaden (Springer Vieweg), 2014.
- Spath, Dieter (Hrsg.) et al.: Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0, Stuttgart (Fraunhofer Verlag), 2019.
- Statistisches Bundesamt: Bruttowertschöpfung nach ausgewählten Wirtschaftsbereichen in jeweiligen Preisen, 2019a,
<https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Konjunkturindikatoren/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen/vgr210.html> (11. Jun. 2019).
- Statistisches Bundesamt: Erwerbstätige und Arbeitnehmer nach Wirtschaftsbereichen (Inlandskonzept) 1 000 Personen, 2019b
<https://www.destatis.de/DE/Themen/Arbeit/Arbeitsmarkt/Erwerbstaetigkeit/Tabellen/arbeitnehmer-wirtschaftsbereiche.html> (11. Jun. 2019).
- Steegmüller, Dieter; Zürn, Michael: Wandlungsfähige Produktionssysteme für den Automobilbau der Zukunft, in: Handbuch Industrie 4.0 Bd. 1. Produktion (Hrsg.: Vogel-Heuser, Birgit; Bauernhansl, Thomas; ten Hompel, Michael), Berlin (Springer Vieweg), 2. Auflage, 2017.
- Steven, Marion (Hrsg.): Industrie 4.0: Grundlagen - Teilbereiche - Perspektiven, Stuttgart (Verlag W. Kohlhammer), 1. Auflage, 2019.
- Strate, Gregor; Kersten, Jan: Der aktuelle Begriff. Funkchips - „Radio Frequency Identification“ (RFID), in Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages (2005) Nr. 15, <https://www.bundestag.de/resource/blob/513498/cdbee37b059a20a2256f058e0186ed19/rfid-data.pdf> (03. Jun. 2019).
- Sucky, Eric et al.: Industrie 4.0: Marketingkampagne oder Revolutionsbeginn?, in: Mobility in a globalised world 2015 (Hrsg.: Sucky, Eric; Werner, Jan; Kolke, Reinhard; Biethahn, Niels), Bamberg (OPUS), 2018.
- SWR: Der Zinnabbau zerstört die indonesische Insel Bangka, 2015,
<https://www.daserste.de/information/politik-weltgeschehen/weltspiegel/sendung/swr/2014/indonesien-bangka-zinnabbau-100.html> (29. Jun. 2019).
- Teichert, Carsten: Risikofreier Umstieg in Industrie 4.0 mit der Produktions- und Logistiksimulationssoftware WITNESS, in: Mit Innovationsmanagement zu Industrie 4.0: Grundlagen, Strategien, Erfolgsfaktoren und Praxisbeispiele (Hrsg.: Granig, Peter; Hartlieb, Erich; Heiden, Bernhard), Wiesbaden (Springer Gabler), 2018.
- Ternès, Anabel: Nachhaltigkeit und Digitalisierung als Chance für Unternehmen, in: Nachhaltiges Management (Hrsg.: Englert, Marco; Ternès, Anabel), Berlin, Heidelberg (Springer Gabler), 2019.

- Thiele, Thomas; Meisen, Tobias; Jeschke, Sabina: Smart Factory - Virtualisierungsstrategien im Produktionsprozess, in: Handbuch Virtualität (Hrsg.: Kasprowicz, Dawid; Rieger, Stefan), Wiesbaden (Springer VS), 2019.
- Tremmel, Jörg: Nachhaltigkeit als politische und analytische Kategorie - Der deutsche Diskurs um nachhaltige Entwicklung im Spiegel der Interessen der Akteure, München (ökom Verlag), 2003.
- Umweltbundesamt: Kohlendioxid-Emissionen, 2019,
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/kohlendioxid-emissionen> (02. Jul. 2019).
- Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau: Industrie 4.0 konkret - Lösungen für die Praxis, Frankfurt (VDMA Verlag GmbH), 2016.
- Verein Deutscher Ingenieure: VDI 4070. Nachhaltiges Wirtschaften in kleinen und mittelständischen Unternehmen. Anleitung zum nachhaltigen Wirtschaften, VDI-Richtlinien, 2016.
- Vieweg, Wolfgang (Hrsg.): Nachhaltige Marktwirtschaft. Eine Erweiterung der Sozialen Marktwirtschaft, Wiesbaden (Springer Gabler), 2017.
- Vogel-Heuser, Birgit; Bayrak, Gülden; Frank, Ursula: Forschungsfragen in „Produktionsautomatisierung der Zukunft“, acatech Materialien. Diskussionspapier für die acatech Projektgruppe „ProCPS - Production CPS“, 2012,
https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/03/acatech_Materialband_Nr15_WEB.pdf (08 Jun. 2019).
- Voigt, Ingo: Definition: Fabrik, 2018,
<https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/fabrik-32333> (01. Jun. 2019).
- Weizsäcker, Rober K. von et al.: Definition: Produktionsprozess, 2018,
<https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/produktionsprozess-45377> (29. Jun. 2019).
- World Commission on Environment and Development (WCED): Report of the World Commission on Environment and Development. Our Common Future, 1987,
https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/UN%20WCED%201987%20Brundtland%20Report.pdf (03. Jun. 2019).
- Zillmann, Mario; Wilk, Claus: Smart Factory - Wie die Digitalisierung Fabriken verändert, Mindelheim (Lünendonk GmbH), 2016.

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Hamburg, den



Einverständniserklärung

Ich erkläre mich damit

einverstanden,

nicht einverstanden

dass ein Exemplar meiner Bachelor- (Master-) Thesis in die Bibliothek des Fachbereichs aufgenommen wird; Rechte Dritter werden dadurch nicht verletzt.

Hamburg, den

