

Smart und Sustainable? – Industrie 4.0 aus der Perspektive der Nachhaltigkeit

David Karl, Immanuel Zitzmann

Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, insbes. Produktion und Logistik, Otto-Friedrich-Universität Bamberg, Feldkirchenstraße 21, 96052 Bamberg, david.karl@uni-bamberg.de; immanuel.zitzmann@uni-bamberg.de.

1	Einführung	79
2	Theoretische Grundlagen.....	80
3	Analyse ausgewählter Indikatorenbereiche	85
4	Fazit und Ausblick.....	92
5	Literaturverzeichnis	93

Abstract:

Die Industrie 4.0 ist sowohl Herausforderung wie auch Chance für den Wirtschaftsstandort Deutschland. In der Diskussion um die Veränderung der industriellen Arbeitswelt wird neben Cyber-Physischen Systemen, dem Internet der Dinge und Dienstleistungen, Selbststeuerung und Mobilität auch von der Nachhaltigkeit dieser Entwicklung gesprochen. Was darunter zu verstehen ist, bleibt jedoch meist unklar. Dies mag zum einen am ebenfalls schwer zu fassenden Begriff der Nachhaltigkeit liegen, zum anderen aber auch an der Tatsache, dass oft unklar ist, welche Auswirkungen die vierte industrielle Revolution auf ökologische oder soziale Aspekte der Produktion hat. Diesen Konsequenzen will der vorliegende Beitrag nachgehen. Ziel ist es dabei, Chancen und Risiken aufzuzeigen, die die Industrie 4.0 für ein nachhaltiges Wirtschafte birgt. Die Untersuchung ist dabei wie folgt gegliedert:

Kapitel 2 legt zunächst die begrifflichen und inhaltlichen Grundlagen des Beitrags. Dies umfasst auch die Vorstellung von Ansätzen zur Operationalisierung der Nachhaltigkeit. Auf diesen Ansätzen baut Kapitel 3 auf und analysiert anhand der existierenden Literatur für ausgewählte Indikatorenbereiche, ob aktuelle Entwicklungen im Kontext der Industrie 4.0 das nachhaltige Wirtschaften unterstützen oder diesem entgegenwirken. Kapitel 4 zieht ein auf den vorherigen Ausführungen aufbauendes Fazit.

1 Einführung

„[...] Die] rasant zunehmende Digitalisierung von Wirtschaft und Gesellschaft [...] verändert nachhaltig die Art und Weise, wie zukünftig in Deutschland produziert und gearbeitet wird. [...] Es] bestimmen nun intelligente Fabriken (sogenannte „Smart Factories“) die vierte industrielle Revolution.“¹ - „In Zeiten des Fachkräftemangels und der zunehmenden Diversität der Beschäftigten [...] ermöglicht Industrie 4.0 [...] damit nachhaltige Produktivität durch Arbeit.“²

Diese Zitate der Plattform Industrie 4.0 (2016) und des Arbeitskreis Industrie 4.0 (2013) fassen prägnant zusammen, dass die aktuell stattfindende vierte industrielle Revolution eine langfristige, dauerhafte Veränderung der Produktionswirtschaft in Deutschland bedeutet.³ Der angesprochene Begriff einer *nachhaltigen* Veränderung bezieht sich in beiden Fällen auf die „längere Zeit anhaltende Wirkung“⁴, ist allerdings schon bei einer geringfügig anderen Formulierung nicht mehr eindeutig interpretierbar, wie das folgende Zitat zeigt: „Die vierte industrielle Revolution ist für den Standort Deutschland ein wichtiger Faktor, um *nachhaltig* wirtschaftlich produzieren zu können.“⁵ Diese Einschätzung von PWC mag zwar zunächst wirklich nur auf eine lang anhaltende Wirtschaftlichkeit abzielen. Bei genauerem Betrachten bringt sie jedoch die Mehrdeutigkeit des Nachhaltigkeitsbegriffs zu Tage: Der Nachhaltigkeit geht es um mehr als wirtschaftliche Aspekte - wie ist die angesprochene Veränderung unter anderen Aspekten, beispielsweise also in ökologischer oder sozialer Hinsicht zu beurteilen? Zu dieser zweiten Bedeutung des Begriffs „nachhaltig“ lassen sich in weiteren Veröffentlichungen zum Thema Industrie 4.0 unmissverständliche Aussagen oder Forderungen finden:

„Die Digitalisierung ermöglicht auch Innovationen für ein *öko-sozial verträglicheres Wirtschaften* - wenn denn das Potential genutzt wird.“⁶ - „In einer ‚intelligenten, vernetzten Welt‘ wird das Internet der Dinge und Dienste in allen Bedarfsfeldern Einzug halten. Der Wandel vollzieht sich [...] bei *nachhaltigen Mobilitätskonzepten* (Smart Mobility, Smart Logistics) [...]“⁷ - „Industrie 4.0: An die Produktion der Zukunft werden hohe Anforderungen gestellt: Sie muss intelligent, wandelbar, effizient und *nachhaltig* sein.“⁸

Alle dieser beispielhaft genannten Quellen erwähnen einen Zusammenhang zwischen Industrie 4.0 und der Nachhaltigkeit, bleiben aber eine nähere Untersuchung schuldig. Aus diesem Grund befasst sich die vorliegende Untersuchung mit den Chancen und Risiken der Industrie 4.0 aus der bislang sehr oberflächlich behandelten Perspektive der Nachhaltigkeit und soll folgende Fragen beantworten:

¹ Plattform Industrie 4.0 (2016).

² Kagermann/Wahlster/Helbig (2013), S. 20.

³ Vgl. Bauernhansl (2014), S. 33.

⁴ Duden (2017).

⁵ PWC (2014), S. 19.

⁶ Bergius (2015).

⁷ Kagermann/Wahlster/Helbig (2013), S. 23.

⁸ Fraunhofer-Gesellschaft (2016).

- Welche Möglichkeiten zur Beurteilung von Nachhaltigkeitsaspekten im Kontext der industriellen Digitalisierung existieren?
- Welche Chancen und Risiken bietet die Industrie 4.0 für ein nachhaltiges Wirtschaften?

Hierzu stellt der Beitrag zunächst Grundlagen zu Industrie 4.0 sowie zum Begriff der Nachhaltigkeit und deren möglicher Operationalisierungen vor, um anschließend anhand einer unstrukturierten Literaturanalyse einen ersten Überblick über mögliche Auswirkungen der digitalen Transformation in der industriellen Produktion auf Aspekte der Nachhaltigkeit zu geben.

2 Theoretische Grundlagen

Sowohl bei dem Begriff Industrie 4.0 wie auch dem der Nachhaltigkeit handelt es sich um Bezeichnungen, deren Verständnis nicht immer einheitlich ist. Daher werden diese Konzepte in Abschnitt 2.1 und Abschnitt 2.2 zunächst allgemein im Rahmen des vorliegenden Beitrags definiert. Abschnitt 2.3 stellt Ansätze zur Operationalisierung der Nachhaltigkeit vor, die im Anschluss für die Beurteilung konkreter Entwicklungen herangezogen werden.

2.1 Industrie 4.0 und seine Inhalte

Der Begriff Industrie 4.0 beschreibt die Hightech-Strategie der Bundesregierung und wird auch durch diese geprägt. Eine allgemein anerkannte und entsprechend verbreitete Definition existiert jedoch nicht. Die Terminologie fasst vielmehr einen Paradigmenwechsel zusammen, welcher durch eine zunehmende Digitalisierung, intelligente Produkte und Maschinen sowie sich selbst steuernde, modulare Fertigungsanlagen gekennzeichnet ist. Dem vorliegenden Beitrag dient das auf einem Review verschiedenster Definitionsansätze aufbauende Begriffsverständnis von Sucky et al. als Ausgangspunkt. Demnach steht der Begriff Industrie 4.0 „[...] für die vierte industrielle Revolution, einer neuen Stufe der Organisation und Steuerung des gesamten Wertschöpfungsnetzwerks über den Lebenszyklus von Produkten hinweg. Diese wird durch die Integration von Cyber-Physischen Systemen in Produktion und Logistik sowie durch die Anwendung des Internets der Dinge als Infrastruktur ermöglicht. Dadurch werden alle an der Wertschöpfung beteiligten Instanzen miteinander vernetzt, Informationen in Echtzeit bereitgestellt und durch die autonome Interaktion der Instanzen sowie deren Selbststeuerung ein besserer Wertschöpfungsfluss gewährleistet. Diese Voraussetzungen sind notwendig, um individualisierte Produkte in einer hoch flexiblen (Großserien-)Produktion fertigen zu können.“⁹

Ziel der Industrie 4.0 ist es somit, eine flexible Produktion zur Erfüllung individueller Kundenbedürfnisse zu gestalten und umzusetzen. Die organisatorische Gestaltung der betrachteten Leistungssysteme und deren Steuerung stehen dabei im Mittelpunkt

⁹ Sucky et al. (2016), S. 252.

der Betrachtung. Zusammen mit weiteren Komponenten bilden Cyber-Physische Systeme und das Internet der Dinge die Grundlage entsprechender Konzepte.¹⁰ Durch Aufnahme dieser Bestandteile in klassische Produktionsumgebungen entsteht eine intelligente Fabrik, die sog. „Smart Factory“. Die vorgenannten technischen Voraussetzungen ermöglichen eine digitale Abbildung aller physischen Prozesse und verbessern die Informationstransparenz.

Die additive Fertigung - auch als 3D-Druck bekannt - ist eine weitere Entwicklung in diesem Kontext, um kundenindividuelle physische Objekte zu „drucken“. ¹¹ Digitale Modelle der Produkte und generative Fertigungstechnologien ermöglichen es, komplexe Teile als Einzelstücke herzustellen. Auch die Wirtschaftlichkeit entsprechender Verfahren soll sich langfristig der Massenfertigung annähern.

„Big Data“ steht als Schlagwort für das mit all diesen Entwicklungen verbundene Datenvolumen, die Datenvielfalt und -veränderungsgeschwindigkeit sowie die dadurch ermöglichte Wertschöpfung.¹² Auf Basis dieser Daten entstehen vielfältige Analyse- und Optimierungsszenarien mit wertschöpfungsrelevantem Charakter. Als ein Beispiel sei hier „Predictive Maintenance“ genannt, bei der durch eine kontinuierliche Analyse der Daten, die von Fertigungsmaschinen über entsprechende Sensoren erfasst werden (bspw. Temperatur, Schwingungsverhalten, Energieverbrauch), mögliche Defekte und Produktionsausfälle bereits vor ihrem Eintreten durch eine frühzeitige Ersatzteilbestellung und bedarfsgerechte Wartung der Maschinen verhindert werden können.¹³

„Logistik 4.0“, auch „smart logistics“ genannt, bezeichnet die technische Unterstützung für die innerbetriebliche Logistik wie auch die Transportlogistik.¹⁴ Diese nutzt unter anderem autonom agierende Systeme, die eine höhere Flexibilität und bessere Skalierbarkeit erlauben. Logistik 4.0 kann sowohl als Treiber als auch als Folge einer Industrie 4.0 interpretiert werden.

2.2 Aspekte der Nachhaltigkeit

Nachhaltiges Handeln „[...] meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs [...]“.¹⁵ Diese Formulierung des Brundtland-Reports bildet die Grundlage jeder Nachhaltigkeitsdiskussion. Es stellt sich jedoch die Frage, welche Bedürfnisse („needs“) im Sinne der Nachhaltigkeit befriedigt werden sollen und mit welchen Ressourcen dies möglich ist.

Es hat sich die Erkenntnis durchgesetzt, dass die zu betrachteten Ressourcen nicht nur eine ökonomische, sondern auch eine ökologische und weitergehend eine soziale Komponente besitzen. Diese Sichtweise fasst das sogenannte Triple-Bottom-Line-

¹⁰ Vgl. Erdle (2014), S. 12.

¹¹ Vgl. Gebhardt (2014), S. 2.

¹² Vgl. De Mauro/Greco/Grimaldi (2015), S. 103.

¹³ Vgl. Schöning/Dorchain (2014), S. 545.

¹⁴ Vgl. für den folgenden Absatz Sucky et al. (2016), S. 249f.

¹⁵ World Commission on Environment and Development (1987), S. 8.

Konzept zusammen.¹⁶ Diskutabel ist, ob die drei Komponenten untereinander substituierbar sind oder nicht.¹⁷ Eine schwache Nachhaltigkeitskonzeption geht von einer gegenseitigen Austauschbarkeit aus; der gegenteilige Ansatz, eine starke Nachhaltigkeitskonzeption, schließt eine Substitution zwischen den drei Bereichen aus.¹⁸ Unabhängig von der vertretenen Konzeption beschreibt der Triple-Bottom-Line-Ansatz Nachhaltigkeit sehr allgemein. Hier liegt ein Grund dafür, dass unter dem Begriff der Nachhaltigkeit eine Vielzahl an unterschiedlichen Stoßrichtungen, Konzepten, Ideen, aber auch Produkten zu finden ist.¹⁹ Unter einem nachhaltigen Produkt wird i. d. R. ein Gut verstanden, das die Kundenwünsche erfüllt und dabei eine verbesserte ökologische und soziale Qualität gegenüber einem Alternativprodukt aufweist.²⁰ Dies lässt sich mit dem Anspruch beschreiben, die Umwelt sowie die Gesellschaft sowohl bei der Ressourcengewinnung wie auch bei allen Wertschöpfungsprozessen so wenig wie möglich zu belasten.²¹

Für eine konkrete Beurteilung von Maßnahmen und Entwicklungen bedarf es einer Operationalisierung des Nachhaltigkeitsbegriffes, der über den abstrakten Triple-Bottom-Line-Ansatz hinausgeht. Ein hierfür geeignetes Instrument sind Nachhaltigkeitsindikatoren. Der folgende Abschnitt stellt verschiedene Konzepte gegenüber, aus denen im Anschluss einige besonders relevante Bereiche und Indikatoren für die Untersuchung im Abschnitt 3 dieses Beitrags ausgewählt werden.

2.3 Operationalisierung der Nachhaltigkeit

Die Studie „Indicators for Monitoring Integration of Environment and Sustainable Development in Enterprise Policy“ von Hertin et al. (2001) enthält sog. „Headline Indicators“, die bestimmte Nachhaltigkeitsbereiche den Dimensionen des Triple-Bottom-Line-Konzeptes zuordnen, ohne diese miteinander zu verbinden.²²

¹⁶ Vgl. Elkington (1998), S. 69-96.

¹⁷ Vgl. für die Diskussion z. B. Döring/Ott (2001).

¹⁸ Eine kritische Diskussion dieses Ansatzes würde an dieser Stelle zu weit führen. Es sei jedoch angemerkt, dass durch das Triple-Bottom-Line-Konzept (Ökologie – Ökonomie – Soziales) der ehemals auf fünf Säulen beruhende Ansatz der Rio-Konferenz von 1992 signifikant beschnitten wird. Hiernach stütze sich der Nachhaltigkeitsbegriff auf eine ökologische, ökonomische, soziale, kulturelle und ethnische Entwicklung. Vgl. Flämig (2015), S. 32-33.

¹⁹ Kritisch werden auch die mit diesem Drei-Säulen-Modell (Ökologie – Ökonomie – Soziales) verbundenen Messprobleme und Zielkonflikte diskutiert. Werden die drei Sektoren konsequent als gleichrangig betrachtet, müsste beispielsweise eine Maßnahme zur Reduktion der Schadstoffemissionen (Ökologie) nicht nur mit den damit verbundenen Kosten (Ökonomie) bewertet werden, sondern auch unter dem Aspekt, ob mit dem entsprechenden Aufwand bei z. B. der Bekämpfung von Kinderarbeit (Soziales) ein höherer sozialer Nutzen erzielt werden könnte. Vgl. Bretzke (2014), S. 35-43.

²⁰ Vgl. Seuring/Müller (2008), S. 1700.

²¹ Vgl. Shrivastava (1995), S. 120-126.

²² Vgl. Hertin et al. (2001), S. 12.

Ökologisch	Ökonomisch	Sozial
Energieverbrauch	Wirtschaftsentwicklung	Beschäftigung
Emissionen	Produktivität	Bildung
Transport	Unternehmertum	Einkommensverteilung
Abfall	Innovation	Zugang zu digitalen Services
Ressourcenverbrauch	Investitionen	Arbeitsbedingungen

Tabelle 1: Bereiche der Headline Indicators nach Hertin et al.²³

Jedem der in Tabelle 1 aufgeführten Bereich sind konkrete Indikatoren zugeordnet, so ist bspw. der zur Wirtschaftsentwicklung zugehörige Indikator die jährliche Wachstumsrate des BIP.²⁴ Zusätzlich zu den Headline Indicators existieren auch noch sechs sog. „Integration Indicators“, die verschiedene Dimensionen der Nachhaltigkeit miteinander verknüpfen (z. B. Wettbewerbsfähigkeit und Ressourceneffizienz: Wasserverbrauch und Abfallgenerierung pro Wertschöpfungseinheit).²⁵

Die Commission on Sustainable Development (CSD) der Vereinten Nationen veröffentlicht seit 1995 eine Liste mit Nachhaltigkeitsindikatoren, die aktuell in der dritten Version vorliegt.²⁶ Die Autoren nehmen dort keine Zuordnung der insgesamt 96 Indikatoren in 14 Themenbereichen zu den Nachhaltigkeitsdimensionen vor, um für alle Indikatoren einen integrativen, dimensionsübergreifenden Charakter zu betonen.²⁷ So wäre bspw. das *BIP pro Kopf* im Gegensatz zum *BIP eines Landes* ein Indikator, dem zusätzlich zu ökonomischen auch soziale Aspekte zugeschrieben werden können, da er sich auf den einzelnen Menschen und nicht auf die makroökonomische Dimension bezieht.

Die Bundesregierung Deutschlands veröffentlicht durch das Statistische Bundesamt in aktuell zweijährigem Turnus einen Nachhaltigkeitsbericht, der anhand verschiedener Indikatoren den Erfolg bzw. Misserfolg politischer Strategien zur Förderung einer nachhaltigen Entwicklung misst.²⁸ Der aktuelle Bericht aus dem Jahre 2016 umfasst 17 Indikatorenbereiche, die sich abgesehen von der Strukturierung nur wenig von den 21 Indikatoren des Berichts aus 2014 unterscheiden.²⁹ Für die Indikatoren des Berichts aus 2014 zeigt Kleine entsprechend Abbildung 1 eine Möglichkeit der Einordnung in das Triple-Bottom-Line-Konzept und verdeutlicht damit, dass ein Teil der Indikatoren mehr auf einzelne Dimensionen fokussiert, die Mehrzahl aber einen eher integrativen Charakter einnimmt.

²³ Quelle: in Anlehnung an Hertin et al. (2001), S. 23.

²⁴ Vgl. Hertin et al. (2001), S. 23.

²⁵ Vgl. Hertin et al. (2001), S. 22-24.

²⁶ Vgl. United Nations (2007), S. 3f.

²⁷ Vgl. United Nations (2007), S. 9f.

²⁸ Vgl. Statistisches Bundesamt (2014), S. 3 für die Ziele und den Hintergrund des Berichts.

²⁹ Vgl. Statistisches Bundesamt (2017), S. 120-132; Statistisches Bundesamt (2014), S. 67-71.

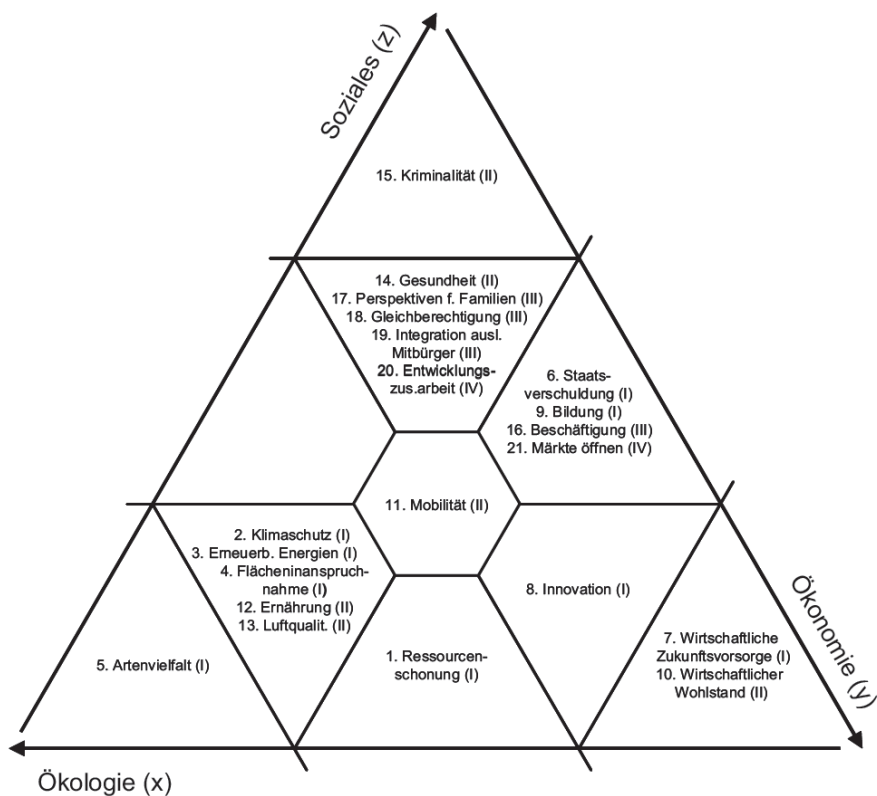


Abbildung 1: Einordnung der Indikatoren in die Nachhaltigkeitsdimensionen nach Kleine.³⁰

Hertin et al. (S. 23)	Commission on Sustainable Development / United Nations (S. 10-14)	Indikatorenbericht der Bundesregierung 2016 (S. 120-132)	Indikatorenbericht der Bundesregierung 2014 (S. 67-71)
Economic Development	Macroeconomic performance	8.4 - Wirtschaftliche Leistungsfähigkeit	10 - Wirtschaftliche Leistungsfähigkeit
Energy use, Resource Use	Material consumption, Energy use, Waste generation	8.1 - Ressourcenschonung	1 - Ressourcenschonung
(Air emissions)	Energy use	7.2 - erneuerbare Energien	3 - erneuerbare Energien
Transport	Transportation	11.2 - Mobilität	11 - Mobilität
Employment	Employment	8.5 - Beschäftigung	16 - Beschäftigung
Working Conditions	Health	3 - Gesundheit	14 - Gesundheit

Tabelle 2: Gegenüberstellung sich entsprechender Indikatorenbereiche in verschiedenen Operationalisierungen der Nachhaltigkeit.

³⁰ Quelle: Kleine (2009), S. 139.

Eine Analyse der unter den Konzepten der Smart Factory und Smart Logistics zusammengefassten Entwicklungen anhand aller soeben aufgezeigten Operationalisierungen und möglichen Indikatoren übersteigt den Umfang des vorliegenden Beitrags. Aufgrund der Überschneidungen der verschiedenen Operationalisierungen ist dies auch nicht sinnvoll. Hierzu zeigt Tabelle 2 einige ausgewählte Bereiche, bei denen in der Literatur Zusammenhänge zwischen Industrie 4.0 und nachhaltiger Entwicklung identifiziert werden konnten und für die sich in allen bisher aufgegriffenen Operationalisierungskonzepten der Nachhaltigkeit Entsprechungen finden lassen. Dies impliziert nicht, dass die Indikatoren im Detail identisch sind, die Bereiche intendieren jedoch jeweils einen sehr ähnlichen Zweck.

3 Analyse ausgewählter Indikatorenbereiche

Die Struktur der Analyse orientiert sich an den in Tabelle 2 angeführten Bereichen der Nachhaltigkeit und den dazugehörigen Indikatoren im Indikatorenbericht der Bundesregierung 2014, da diese auf Basis der Einordnung von Kleinen dadurch eine Beurteilung hinsichtlich der Nachhaltigkeitsdimensionen ermöglicht. Grundlage der folgenden Darstellung sind Aussagen, die im Rahmen einer unstrukturierten Literatursuche identifiziert werden konnten.

3.1 Wirtschaftliche Leistungsfähigkeit

Allgemein bemisst sich die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit eines Landes am Bruttoinlandsprodukts und dessen Veränderung. In Bezug auf die Lebensqualität der Bewohner eines Landes muss das BIP pro Kopf herangezogen werden.³¹ Bezogen auf einzelne Wirtschaftsbereiche oder individuelle Unternehmen lässt sich das jeweilige Branchen- oder Unternehmenswachstum betrachten, um eine Aussage darüber treffen zu können, wie sich die erwarteten Veränderungen im Rahmen der Industrie 4.0 auf die betrachteten Objekte auswirken.

Der Industrie 4.0 wird in der Gesamtheit der Entwicklungen und ohne konkrete Einflussfaktoren die Fähigkeit zugeschrieben, die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie und somit die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit in Deutschland positiv zu beeinflussen. Das Institut für Arbeitsmarkt- und Bildungsforschung (IAB) kalkuliert in einer Szenariorechnung mit einer preisbereinigten Steigerung des BIP um insgesamt ca. 33 Mrd. € bis 2030.³² Eine PwC-Studie prognostiziert mittels einer Befragung von 235 überwiegend aus dem verarbeitenden Gewerbe stammenden Unternehmen ein zusätzliches jährliches Unternehmenswachstum von 2,5 % durch Industrie 4.0 - Lösungen und digitalisierte Produkte unabhängig von der Unternehmensgröße.³³ Auch Studien von BITKOM/Fraunhofer sowie von GeSI erwarten ähnliche positive Effekte.

³¹ Vgl. Statistisches Bundesamt (2014), S. 69.

³² Vgl. Wolter et al. (2015), S. 54.

³³ Vgl. PWC (2014), S. 47-49; ebd., S. 29f.

Letztere gehen bis zum Jahr 2030 von einer Steigerung des weltweiten Wirtschaftswachstums von 11 Billionen US-Dollar auf Grund des zunehmenden Einsatzes von Informations- und Kommunikationstechnologie in den Wirtschaftssektoren Mobilität und Logistik, Produktion, Ernährung, Bau, Energie, Gesundheit, Bildung aus.³⁴

Für die in der Studie von BITKOM/Fraunhofer untersuchten Branchen (Maschinen- und Anlagenbau, Elektrotechnik, Automobilbau, chemische Industrie, Landwirtschaft, Informations- und Kommunikationstechnologie) wird mit einem zusätzlichen Wachstum von 1,7 % gerechnet, welches auf die Industrie 4.0 zurück zu führen ist.³⁵ Die Autoren rechnen allerdings mit positiven gesamtwirtschaftlichen Effekten, die weit über die betrachteten Branchen hinaus reichen. Somit ist zu erwarten, dass sich die Industrie 4.0 gemessen am Indikator der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit in den kommenden Jahrzehnten sowohl aus ökonomischer Sicht (unternehmens- oder branchenspezifische Wettbewerbsfähigkeit) als auch in der sozialen Dimension (mehr Wirtschaftsleistung pro Kopf) positiv auf Nachhaltigkeitsaspekte auswirkt.

3.2 *Ressourcenschonung*

Der vom Statistischen Bundesamt erstellte Indikatorenbericht aus dem Jahr 2014 erfasst Aspekte der Ressourcenschonung mit den Indikatoren Endenergieproduktivität, Primärenergieverbrauch und Rohstoffproduktivität.³⁶ Entwicklungen, die der Industrie 4.0 zugeordnet werden und direkt oder indirekt Einfluss auf diese Kennzahlen haben, sind in Tabelle 3 angegeben. Hier sind auch die voraussichtlichen Folgen der einzelnen Aspekte aufgeführt.

Die Auflistung lässt erkennen, dass viele Entwicklungen der Industrie 4.0 zu einer Reduktion des Energie- und Ressourcenverbrauchs führen. Dieser Aspekt wird häufig als entscheidender ökonomischer Vorteil der industriellen Digitalisierung genannt. Auch ohne neue Geschäftsmodelle sind dadurch Wettbewerbsvorteile zu realisieren. Ein verringertes Ressourceneinsatz ist auch aus ökologischer Perspektive positiv zu bewerten. Somit leistet die vierte industrielle Revolution einen Beitrag zu nachhaltigem Wirtschaften, wenn die Aspekte Energieeinsatz, Ressourcenverbrauch und Rohstoffproduktivität betrachtet werden. Lediglich bei der additiven Fertigung finden sich keine eindeutigen Aussagen über deren Auswirkung auf die ökologische Dimension der Nachhaltigkeit. Zwar reduziert eine Vor-Ort-Produktion den entsprechenden Transport- und Lagerbedarf, der hohe Ausschuss und Energiebedarf dieses Herstellungsverfahrens könnte die entsprechenden Einsparungen aber übersteigen.

³⁴ Vgl. GeSI (2015), S. 3.

³⁵ Vgl. für den folgenden Absatz BITKOM/Fraunhofer (2014), S. 39; Bauer/Horváth (2015); S. 517.

³⁶ Vgl. Statistisches Bundesamt (2014), S. 67.

Entwicklung	Auswirkungen
Zunehmende Verbreitung von Energiemanagementsystemen.	Energieeinsparung von 10 %. ³⁷
Einsatz von Simulationen parallel zu physischen Prozessen und Maschinen.	Ressourcenorientierte Planung, die den Energie- und Rohstoffbedarf reduziert. ³⁸ Optimierung im laufenden Betrieb ermöglicht einen Produktivitätszuwachs von 10 %. ³⁹
Erhöhte Prozesstransparenz durch Datenerfassung und -aufbereitung.	Optimierte Planung erlaubt jährliche Effizienzsteigerungen von mind. 3,3 %. ⁴⁰
Zunehmender Einsatz der additiven Fertigung.	Vermeidung von Abfällen in der Produktion. ⁴¹ Produktion vor Ort reduziert den Ressourceneinsatz für den Transport. Zusätzlicher Materialbedarf durch benötigte Stützstrukturen. Hoher Energieverbrauch des Fertigungsverfahrens.
Aktive Unterstützung der Herstellungsprozesse durch Cyber-Physical-Systems.	Produktion wird bis zu 50 % produktiver. ⁴²
Zunehmender Einsatz von RFID-Tags.	Resultierende Beschleunigung der Identifikation führt zu kürzeren Durchlaufzeiten und einer erhöhten Energieeffizienz. ⁴³
Weiter zunehmende Integration von Informations- und Kommunikationstechnologie in Wertschöpfungsprozesse.	Entkopplung des Wirtschaftswachstums vom Energieverbrauch. ⁴⁴

Tabelle 3: Auswirkungen der Industrie 4.0 auf Endenergieproduktivität, Primärenergieverbrauch und Rohstoffproduktivität.

3.3 Erneuerbare Energien

Trotz steigender Energieeffizienz wird auch zukünftig Energiebedarf bestehen. Dieser nimmt aufgrund des Wirtschaftswachstums und nicht zuletzt der in der Industrie 4.0 eingesetzten elektronischen Systeme weiter zu. Nachhaltiges Wirtschaften ist daher nur möglich, wenn es langfristig gelingt, den gesamten Energiebedarf aus erneuerba-

³⁷ Vgl. Siemens (2012), S. 13.

³⁸ Vgl. Krückhans/Meier (2013), S. 3; ebd., S. 9.

³⁹ Vgl. Siemens (2012), S. 19.

⁴⁰ Vgl. Koch et al. (2014), S. 19; Busch et al. (2015), S. 19.

⁴¹ Vgl. zu diesem und den weiteren Vor- und Nachteilen der additiven Fertigung Petschow et al. (2014), S. 27 und die hier angegebene Literatur.

⁴² Vgl. Kagermann (2014), S. 33-34.

⁴³ Vgl. VDMA (2015).

⁴⁴ Vgl. GeSI (2015), S. 3.

ren Quellen zu decken. Der Indikatorenbericht beinhaltet daher mit dem Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch bzw. dem Anteil des Stroms aus erneuerbaren Energiequellen am Stromverbrauch zwei Größen zur Operationalisierung dieses Aspektes.⁴⁵

Eine große Herausforderung der Energieversorgung aus erneuerbaren Quellen ist deren Abhängigkeit vom Wetter. Dies betrifft insbesondere die Stromgewinnung mit Hilfe von Photovoltaik- sowie Windkraftanlagen. Zudem ermöglichen es diese Quellen nicht, kurzfristige Bedarfe zu decken, wenn die Sonne nicht scheint bzw. kein Wind weht. Die daraus entstehenden Leistungsspitzen und -täler auf der Angebotsseite stellen eine entsprechende Herausforderung dar. Die Industrie 4.0 ist jedoch in der Lage, einen Beitrag zur Bewältigung dieser Problematik zu leisten. Die erhöhte Transparenz von Prozessen und Verfügbarkeit von Daten ermöglicht ein intelligentes Stromnetz, ein Smart Grid.⁴⁶ Dieses verfügt über die Fähigkeit einer flexiblen und nachfragegesteuerten Stromerzeugung, die intelligente Übertragung und Verteilung von vorhandenem Strom sowie eine Speicherung und einen Verbrauch, der sich am Angebot orientiert. So ist denkbar, dass ein intelligentes Stromnetz durch aktives Lastenmanagement für einen gleichbleibenden Stromverbrauch sorgt.⁴⁷ In diesem Zusammenhang können dezentrale Speicher wie die Batterien von Elektrofahrzeugen zum Lastenausgleich genutzt werden.⁴⁸ Gleiches gilt für Speicher, die in großer Anzahl und an verschiedensten Stellen in der industriellen Produktion existieren.⁴⁹ Dafür bedarf es aber einer entsprechenden Vernetzung und Koordination. Gelingt diese, so liegt in der vierten industriellen Revolution ein großes Potenzial, die in Deutschland angestrebte Energiewende hin zu erneuerbaren Energiequellen zu verwirklichen.⁵⁰ Dies beeinflusst die Indikatoren positiv, die den Anteil entsprechender Quellen am Stromverbrauch messen. Hier existiert daher nicht nur ein Potenzial, die Energiewende positiv zu gestalten sondern auch, die ökologische Dimension der Nachhaltigkeit zu stärken. Auswirkungen des Smart Grids auf die soziale Perspektive sind nicht zu erkennen.

3.4 *Mobilität*

Im Gegensatz zu Bretzke, welcher Mobilität alternativ zur sozialen Dimension als zentrale Säule der Nachhaltigkeit aus logistischer Perspektive sieht, ordnet Kleine diese im Zentrum des Nachhaltigkeitsdreieckes aus Abbildung 1 ein.⁵¹ Auch der Indikatorenbericht des Statistischen Bundesamts nennt Mobilität als einen im Rahmen des nachhaltigen Wirtschaftens zu beachtenden Aspekt. Dieser wird mit den Kennzahlen Güter- und Personentransportintensität sowie dem Anteil des Schienenverkehrs und

⁴⁵ Vgl. Statistisches Bundesamt (2014), S. 67.

⁴⁶ Vgl. für die Ausführungen zum Smart Grid Botthof (2015), S. V3.

⁴⁷ Vgl. Jasperneite/Bretschneider (2013), S. 8.

⁴⁸ Vgl. Bundesnetzagentur (2011), S. 56.

⁴⁹ Vgl. Richter (2015), S. 26-31.

⁵⁰ Vgl. Botthof (2015), S. V3.

⁵¹ Vgl. Kleine (2009), S. 139 sowie Abschnitt 2.3.

der Binnenschifffahrt an der gesamten Güterbeförderungsleistung gemessen.⁵² Die letzten beiden dieser Indikatoren sollen erhöht werden. Bei der Transportintensität von Gütern und Personen werden hingegen möglichst niedrige Werte angestrebt. In der Literatur lassen sich drei im Zuge der Industrie 4.0 stattfindende Entwicklungen identifizieren, die Einfluss auf die genannten Größen haben.

Dies ist zunächst die bereits in Abschnitt 3.2 aufgeführte additive Fertigung. Wird sie realisiert, so wandelt sich die Produktion von einer zentralen zu einer dezentralen Herstellung am Bedarfsort. Petschow et al. zeigen in mehreren Fallstudien, dass sich dadurch sowohl Transportentfernungen wie auch die Anzahl von Rücktransporten deutlich reduzieren lassen.⁵³ Somit verringert sich die Gütertransportintensität positiv. Auch die Reduktion der Personentransportintensität lässt sich vermuten. Hierfür spricht, dass sich bei dezentralen Strukturen die Anfahrtswege der Mitarbeiter verkürzen. Positive Auswirkungen auf den Mix des multimodalen Verkehrs sind jedoch nicht erkennbar. Neben der additiven Fertigung hat die durch die vierte industrielle Revolution forcierte Flexibilität Auswirkungen auf den Güter- und Personenverkehr. So sind eine hohe räumliche und zeitliche Anpassungsfähigkeit von Mitarbeitern Grundvoraussetzungen des zukünftigen Arbeitslebens.⁵⁴ Auch physische Produkte und Güter müssen in dezentralen Wertschöpfungsnetzwerken flexibel verfügbar und demzufolge mobil sein. Beide Punkte ziehen zwangsläufig eine Erhöhung der Personen- bzw. Gütertransportintensität nach sich. In diesen Punkten wirkt sich die Industrie 4.0 somit negativ auf Nachhaltigkeit aus. Ein weiterer Punkt, der Reboundeffekt, verstärkt diese Entwicklung zudem. So wird insgesamt mit einer Zunahme des Straßengüterverkehrs gerechnet.⁵⁵ Dieser Trend wird durch effiziente Fahrzeuge unterstützt. Der Anteil des Schienenverkehrs sowie der Binnenschifffahrt an der Güterbeförderungsleistung wird daher eher ab- als zunehmen. So bleibt insgesamt festzustellen, dass sich die durch die vierte industrielle Revolution verändernden Mobilitätsaspekte in der Summe negativ auf die Nachhaltigkeit auswirken.

3.5 Beschäftigung

Der Indikatorenbericht der Bundesregierung operationalisiert die Beschäftigung durch die Erwerbstätigenquote, um zu beurteilen, ob das Ziel einer Steigerung des Beschäftigungsniveaus erfüllt wird.⁵⁶ Etwaige Veränderungen lassen sich daraus abgeleitet auch durch Veränderungen in der Anzahl an Arbeitsplätzen oder Veränderungen der Arbeitslosenquoten beurteilen.

Durch intelligente Fabriken, in denen immer mehr autonome Maschinen Tätigkeiten vollziehen, die vormals von menschlichen Arbeitern verrichtet wurden, verändern sich

⁵² Vgl. zu den Indikatoren und der Zielsetzung Statistisches Bundesamt (2014), S. 69.

⁵³ Vgl. Petschow et al. (2014), S. 49-51.

⁵⁴ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2015), S. 4. Auf daraus resultierende gesundheitliche Folgen geht Abschnitt 3.5 ein.

⁵⁵ Vgl. Bretzke et al. (2016), S. 83.

⁵⁶ Vgl. Statistisches Bundesamt (2014), S. 70.

die Tätigkeitsfelder, in denen Menschen in der Industrie beschäftigt sind.⁵⁷ So werden laut IAB bis 2030 bis zu 760.000 Arbeitsplätze zwischen den Berufsfeldern umgeschichtet, wobei zugleich zwischen 60.000 und 100.000 Arbeitsplätzen verloren gehen.⁵⁸ Insbesondere direkt an der Produktion beteiligte Berufe sind von einem starken Arbeitsplatzabbau von mehr als 10 % betroffen.⁵⁹

Auch das Weltwirtschaftsforum rechnet in den nächsten Jahren mit einer deutlichen Verringerung der Zahl der Beschäftigten.⁶⁰ Bis 2020 sollen über alle Wirtschaftszweige gesehen 7,1 Millionen Jobs weltweit verloren gehen, während im selben Zeitraum nur 2 Millionen neue Jobs entstehen - netto verschwinden durch die Digitalisierung fast 5 Millionen Arbeitsplätze. Im produzierenden Gewerbe fallen laut dieser Prognose insgesamt ca. 1,6 Millionen Arbeitsplätze weg, auch wenn dort laut Expertenmeinung zukünftig wieder positive Entwicklungen zu erwarten sind.

Frey und Osborne zeigen in einer Szenariorechnung, dass in den USA fast 50 % aller Arbeitsplätze durch die zunehmende Digitalisierung gefährdet sind.⁶¹ Nach Buhr ist diese extreme Entwicklung in Deutschland aufgrund einer deutlich anders ausgeprägten Arbeitsmarktstruktur und aufgrund des demografischen Wandels eher unwahrscheinlich.⁶² Zudem bedeutet eine Automatisierung eines Arbeitsplatzes noch nicht zwangsweise den kompletten Wegfall, sondern lediglich eine erforderliche Veränderung des Einsatzes menschlicher Ressourcen.⁶³ Im Ergebnis bleibt als Konsequenz für Deutschland die Tendenz zu einer starken Veränderung der Arbeitswelt mit steigendem Anpassungsdruck und Qualifikationsbedarf.

Die zunehmende Automatisierung führt neben einem Verlust der absoluten Anzahl an Arbeitsplätzen auch zu einer Polarisierung der Arbeitsinhalte: Während Arbeitsplätze für mittel qualifizierte und entlohnte Beschäftigte zurückgehen, werden „[...] die bisher am unteren und oberen Qualifikationsrand eingeordneten [...] eher erfahrungs- und interaktionsbasierten [...] Berufsfelder [...]“ an Bedeutung gewinnen.⁶⁴ Zusammengefasst ist durch die mit der Industrie 4.0 verbundenen Entwicklungen einerseits ein Rückgang des Indikators Erwerbstätigenquote zu erwarten, der aus der sozialen und ökonomischen Perspektive der Nachhaltigkeit negativ zu beurteilen ist. Andererseits bietet die Industrie 4.0 selbst die Chance, durch neue Berufsfelder und Um- bzw. Höherqualifizierungen einen Teil dieser negativen Konsequenzen abzufedern und zu kompensieren.

⁵⁷ Vgl. Wolter et al. (2015), S. 46f.; ebd., S. 49.

⁵⁸ Vgl. Wolter et al. (2015), S. 61; ebd., S. 47.

⁵⁹ Vgl. Wolter et al. (2015), S. 58.

⁶⁰ Vgl. für den folgenden Absatz World Economic Forum (2016), S. 13-15.

⁶¹ Vgl. Frey/Osborne (2013), S. 38

⁶² Vgl. Buhr (2015), S. 15.

⁶³ Vgl. für den folgenden Absatz Bonin/Gregory/Zierahn (2015), S. 23f.

⁶⁴ Vgl. Buhr (2015), S. 15.

3.6 Gesundheit

Im Gegensatz zu den vorherigen Abschnitten sind die vom Indikatorenbericht 2014 verwendeten konkreten Messzahlen im Bereich Gesundheit (Sterblichkeit, Raucherquote, Adipositasanteil) hinsichtlich der Auswirkungen, die Industrie 4.0 mit sich bringt, von geringer Relevanz.⁶⁵ Daher versucht der folgende Abschnitt, diesen Bereiche nicht anhand konkreter Indikatoren, sondern etwas breiter anhand des übergeordneten Nachhaltigkeitspostulats zu beurteilen: Sicherstellung und Förderung der physischen und psychischen Gesundheit („Länger gesund leben“⁶⁶).

Gesundheitliche Aspekte der Industrie 4.0 betreffen die arbeitenden Menschen in den Unternehmen. Deren Arbeitsumfeld wird sich durch zunehmende Automatisierung, kontinuierlichen Umgang mit und Austausch von Daten, die Unterstützung durch Roboter und in vielen Bereichen durch insgesamt steigende Anforderungen stark verändern, was wiederum Einfluss auf die Gesundheit der Beschäftigten hat. Dabei sind teils konträre Entwicklungen zu beobachten.

Eine in weiten Teilen automatisierte Industrie bietet beispielsweise durch eine stärkere Zentrierung der verbleibenden Arbeitsplätze auf den Menschen und seine Bedürfnisse die Chance auf eine hohe Anzahl an interessanten, herausfordernden Arbeitsplätzen.⁶⁷ Diese ermöglichen Entfaltungsmöglichkeiten für die Mitarbeiter und ein hohes Maß an Arbeits-, Kooperations- und Beteiligungsqualität, können also für eine verbesserte psychische Gesundheit der Beschäftigten sorgen.⁶⁸ Eine zunehmende Unterstützung durch Roboter, welche aufgrund verbesserter Sensorik ihre Umwelt wahrnehmen und anstatt in abgesperrten Käfigen nun dynamisch mit Menschen interagieren können, bietet zudem die Möglichkeit, Mitarbeiter bei körperlich anstrengenden Tätigkeiten zu entlasten.⁶⁹ Insbesondere die Automobilindustrie erprobt derartige Assistenzfunktionen bei Montagesystemen bereits mit positiven Erfahrungen in der Praxis.⁷⁰ Vor dem Hintergrund einer zunehmend älter werdenden Belegschaft und dem Bedarf zur Integration körperlich eingeschränkter Mitarbeiter sind hier große Potenziale hinsichtlich der Sicherstellung der physischen Gesundheit der Mitarbeiter erkennbar. Technische Innovationen können außerdem stupide Routineaufgaben übernehmen, Assistenzsysteme sorgen für ein erleichtertes Anlernen in neuen Tätigkeitsfeldern und flexiblere Organisationskonzepte führen zu einer besseren Work-Life-Balance.⁷¹

Auf der anderen Seite wird befürchtet, dass selbststeuernde Anlagen und Maschinen dem Menschen keine Entscheidungsbefugnisse lassen und ihn zudem durch eine unüberschaubare technische Komplexität sowie eine nicht mehr nachvollziehbare Ge-

⁶⁵ Vgl. Statistisches Bundesamt (2014), S. 70; ebd., S. 68.

⁶⁶ Statistisches Bundesamt (2014), S. 70.

⁶⁷ Vgl. Richter et al. (2015), S. 701-704.

⁶⁸ Vgl. Richter et al. (2015), S. 701-704.

⁶⁹ Vgl. Bundesministerium für Bildung und Forschung (2013), S. 29.

⁷⁰ Vgl. Daimler AG (2016).

⁷¹ Vgl. Gerst (2016), S. 18.

schwindigkeit kognitiv überfordern.⁷² Geringere Eingriffs- und Gestaltungsmöglichkeiten in standardisierten Prozessen führen zu einer Entfremdung von der Arbeitstätigkeit, da bspw. Datenbrillen ein Mitdenken der Mitarbeiter zum Teil überflüssig machen.⁷³ Auch die kontinuierliche Datenerfassung und eine eventuell damit einhergehende ständige Kontrolle der Beschäftigten werden als Gefahr für deren Gesundheit gesehen.

Insgesamt lässt sich bei der Betrachtung der Gesundheit von Mitarbeitern keine klare Tendenz erkennen, ob diese durch die Industrie 4.0 gefördert oder gefährdet wird: Viele Fragen sind noch offen und das Verhältnis und die Arbeitsteilung zwischen Mensch und Maschine muss in den nächsten Jahren erst neu definiert und gestaltet werden.⁷⁴

4 Fazit und Ausblick

Auf Basis der in diesem Beitrag verwendeten Literatur sowie den zu Beginn der Arbeit aufgeführten Aussagen ist ein offensichtlicher Zusammenhang zwischen der Industrie 4.0 und der Nachhaltigkeit erkennbar. Wie dieser Zusammenhang aussieht, wurde vom vorliegenden Beitrag näher untersucht. Grundlage zur Beantwortung der Forschungsfragen bildet dabei eine unstrukturierte Literaturanalyse. Dabei wurden zunächst Möglichkeiten zur Beurteilung der Nachhaltigkeit im Kontext der Industrie 4.0 betrachtet. Es lässt sich festhalten, dass hierfür kein einheitliches Konzept existiert. Grund hierfür ist u. a., dass die Begriffe Nachhaltigkeit und Industrie 4.0 nicht klar und allgemeingültig definiert sind. Dennoch lassen sich Überschneidungen bei den vorhandenen Operationalisierungsansätzen identifizieren. Besonders der Beitrag von Kleine schlägt eine Brücke zwischen dem Indikatorenbericht aus dem Jahre 2014 und dem Triple-Bottom-Line-Ansatz. Dieses integrative Konzept dient der Untersuchung von Chancen und Risiken, die sich aus der Industrie 4.0 für die Nachhaltigkeit ergeben, als Grundlage.

Bei den analysierten Teilbereichen kann für die Ressourcenschonung sowie der Stromversorgung aus erneuerbaren Energien in Summe ein positiver Effekt der industriellen Digitalisierung auf nachhaltiges Wirtschaften festgestellt werden. Anders ist dies im Bereich der Mobilität zu beurteilen, wo mit eher negativen Effekten auf die Nachhaltigkeit zu rechnen ist. In den Bereichen Beschäftigung und Gesundheit lässt sich keine klare Aussage über die Richtung der Auswirkungen treffen. Vielmehr stellen die Entwicklungen, die als Industrie 4.0 bezeichnet werden, in diesen Themenfeldern gleichzeitig eine Herausforderung wie auch einen möglichen Lösungsansatz auf dem Weg zu einem nachhaltigen Wirtschaften dar.

Die Uneinheitlichkeit der beschriebenen Entwicklungen verlangt nach weiterführenden Analysen. Ein erster Schritt ist hier ein systematischer Literaturüberblick, der die Grundlage für weitergehende Studien darstellt. Die theoretischen Untersuchungen sind

⁷² Vgl. für den folgenden Absatz Gerst (2016), S. 21; Windelband (2014), S. 157f.

⁷³ Vgl. Windelband (2016), S. 89.

⁷⁴ Vgl. Huchler (2015), S. 118; Hirsch-Kreinsen (2014), S. 35.

dabei in einem wechselseitigen Prozess mit den Erfahrungen und Bedürfnissen der unternehmerischen Praxis abzustimmen.

5 Literaturverzeichnis

- Bauer, W./Horváth, P. (2015): Industrie 4.0 - Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland, in: Controlling, Jg. 27, H. 8-9, S. 515-517.
- Bauernhansl, T. (2014): Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma, in: Bauernhansl, T./ten Hompel, M./Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration, Wiesbaden, S. 5-35.
- Bergius, S. (2015): Industrie 4.0 - Treiber für Zukunftsfähigkeit? Online verfügbar unter <http://www.handelsblatt.com/12458016.html>, Stand: 25.05.2016.
- BITKOM/Fraunhofer (2014): Industrie 4.0 - Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland. Online verfügbar unter: <https://www.bitkom.org/noindex/Publikationen/2014/Studien/Studie-Industrie-4-0-Volkswirtschaftliches-Potenzial-fuer-Deutschland/Studie-Industrie-40.pdf>, Stand: 27.07.2016.
- Bonin, H./Gregory, T./Zierahn, U. (2015): Übertragung der Studie von Frey/Osborne (2013) auf Deutschland. Online verfügbar unter: <http://hdl.handle.net/10419/123310>, Stand: 30.11.2016.
- Botthof, A. (2015): Industrie 4.0: Schrittmacher für die Energiewende, in: Frankfurter Allgemeine Zeitung vom 5.03.2015.
- Bretzke, W.-R. (2014): Nachhaltige Logistik. Zukunftsfähige Netzwerk- und Prozessmodelle, 3. Auflage, Berlin, Heidelberg.
- Bretzke, W.-R./Froschmayer, A./Grotemeier, C./Hager, H.-J./Kille, C./Klug, M./Lehmacher, W./Meißner, M./Nehm, A./Roth, A./Schwemmer, M./Terner, D./Wagner, S. (2016): Logistik trifft Digitalisierung – Auswirkungen auf die Entwicklung in 2016 – Ergebnisse des Herbstgipfels 2015, Hamburg.
- Buhr, D. (2015): Soziale Innovationspolitik für die Industrie 4.0. Expertisen und Dokumentationen zur Wirtschafts- und Sozialpolitik, Bonn.
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (2013): Zukunftsbild „Industrie 4.0“. Online verfügbar unter: http://www.bmbf.de/pub/Zukunftsbild_Industrie_4.0.pdf, Stand: 03.04.2016.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2015): Industrie 4.0 und Digitale Wirtschaft – Impulse für Wachstum, Beschäftigung und Innovation, Berlin.

- Bundesnetzagentur (2011): „Smart Grid“ und „Smart Market“ – Eckpunktepapier der Bundesnetzagentur zu den Aspekten des sich verändernden Energieversorgungssystems, Bonn.
- Busch, J./Soukup, A./Dutzler, H./Loinig, M./Gorholt, A. (2015): Industrie 4.0 – Österreichs Industrie im Wandel.
- Daimler AG (2016): Mensch und Roboter - ziemlich beste Freunde. Online verfügbar unter <http://www.daimler.com/innovation/digitalisierung/industrie4.0/mensch-und-roboter.html>, Stand: 01.09.2016
- De Mauro, A./Greco, M./Grimaldi, M. (2015): What is big data? A consensual definition and a review of key research topics, in: Giannakopoulos, G./Kyriaki-Manessi, D. (Hrsg.): AIP Conference Proceedings 1644, S. 97-104.
- Döring, R./Ott, K. (2001): Nachhaltigkeitskonzepte, in: Zeitschrift für Wirtschafts- und Unternehmensethik, Jg. 2, Nr. 3, S. 315-338.
- Duden (2017): Nachhaltigkeit, die. Online verfügbar unter: <http://www.duden.de/rechtschreibung/Nachhaltigkeit>, Stand: 13.01.2017.
- Elkington, J. (1998): Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of the 21st Century. Stoney Creek, CT.
- Erdle, F. (2014): Das Internet der Dinge revolutioniert Wirtschaft und Alltag, in: VDI Nachrichten, Jg. 2014, Nr. 46, S. 12.
- Flämig, H. (2015): Logistik und Nachhaltigkeit, in: Heidbrink, L./Meyer, N./Reidel, J./Schmidt, I. (Hrsg.): Corporate Social Responsibility in der Logistikbranche, Berlin, S. 25-44.
- Fraunhofer-Gesellschaft (2016): Produktion und Dienstleistung - Industrie 4.0. Online verfügbar unter: <http://www.fraunhofer.de/de/forschung/forschungsfelder/produktion-dienstleistung/industrie-4-0.html>, Stand: 12.09.2016.
- Frey, C./Osborne, M. (2013): The Future of Employment: How susceptible are Jobs to Computerisation?, in: Technological Forecasting and Social Change, Jg. 114, S. 254-280.
- Gebhardt, A. (2014): 3D-Drucken. Grundlagen und Anwendungen des Additive Manufacturing (AM), München.
- Gerst, D. (2016): Industrie 4.0. Modebegriff, verheißungsvolle Zukunft oder schöne neue Welt? Online verfügbar unter https://www.bgf-institut.de/fileadmin/redaktion/downloads/BGF-Forum_2016/Gerst-Industrie_4.0.pdf, Stand: 30.12.2016.

- GeSI (Global e-Sustainability Initiative) (2015): SMARTer2030 – ICT Solutions for 21st Century Challenges. Executive Summary, Brüssel.
- Hertin, J./Berkhout, F./Moll, S./Schepelmann, P. (2001): Indicators for Monitoring Integration of Environment and Sustainable Development in Enterprise Policy: Final Report. Online verfügbar unter http://edz.bib.uni-mannheim.de/daten/edz-h/gdb/01/study99-502550_indicators-ph-finalreport010202.pdf, Stand: 12.10.2016.
- Hirsch-Kreinsen, H. (2014): Wandel von Produktionsarbeit - „Industrie 4.0“. Online verfügbar unter: http://www.wiso.tu-dortmund.de/wiso/ts/de/forschung/veroeff/soz_arbeitspapiere/AP-SOZ-38.pdf, Stand: 05.09.2016.
- Huchler, N. (2015): Die Grenzen der Digitalisierung. Neubestimmung der hybriden Handlungsträgerschaft zwischen Mensch und Technik und Implikationen für eine humane Technikgestaltung, in: HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik, Jg. 53, H. 1, S. 109-123.
- Jasperneite, J./Bretschneider, P. (2013): Industrial Smart Grids, in: Beyerer, J./Tacke, M. (Hrsg.): visIT – [Industrie 4.0], Karlsruhe, S. 8-9.
- Kagermann, H./Wahlster, W./Helbig, J. (2013): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. Online verfügbar unter: http://www.bmbf.de/files/Umsetzungsempfehlungen_Industrie4_0.pdf, Stand: 30.08.2016.
- Kagermann, H. (2014): Change Through Digitization – Value Creation in the Age of Industry 4.0, in: Albach, H./Meffert, H./Reichwald, R. (Hrsg.): Management of Permanent Change, New York u.a., S. 23-45.
- Kleine, A. (2009): Operationalisierung einer Nachhaltigkeitsstrategie – Ökologie, Ökonomie und Soziales integrieren, Wiesbaden.
- Koch, V./Kuge, S./Geissbauer, R./Schrauf, S. (2014): Industrie 4.0 – Chancen und Herausforderungen der vierten industriellen Revolution.
- Krückhans, B./Meier, H. (2013): Industrie 4.0 – Handlungsfelder der Digitalen Fabrik zur Optimierung der Ressourceneffizienz in der Produktion, in: Dagelmaier, W./Laroque, C./Klaas, A. (Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik – Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung, Paderborn, S. 31-40.

- Petschow, U./Ferdinand, J.-P./Dickel, S./Flämig, H./Steinfeld, M./Worobei, A. (2014): Dezentrale Produktion, 3D-Druck und Nachhaltigkeit – Trajektorien und Potenziale innovativer Wertschöpfungsmuster zwischen Maker-Bewegung und Industrie 4.0, Berlin.
- Plattform Industrie 4.0 (2016): Was ist Industrie 4.0? Online verfügbar unter <http://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html>, Stand: 30.06.2016.
- PWC (2014): Industrie 4.0. Chancen und Herausforderungen der vierten industriellen Revolution. Online verfügbar unter: <http://www.strategyand.pwc.com/media/file/Industrie-4-0.pdf>, Stand: 12.06.2016.
- Richter, A./Heinrich, P./Stocker, A./Unzeitig, W. (2015): Der Mensch im Mittelpunkt der Fabrik von morgen, in: HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik, Jg. 52, H. 5, S. 690-712.
- Richter, M. (2015): Industrie 4.0 und Energieeffizienz in der Produktion – Aktuelle Entwicklungen und Anwendungsbeispiele, Chemnitz, 14.07.2015.
- Schöning, H./Dorchain, M. (2014): Data Mining und Analyse, in: Bauernhansl, T./ten Hompel, M./Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden, S. 543-554
- Seuring, S./Müller, M. (2008): From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management, in: Journal of Cleaner Production, Jg. 16, Nr. 15, S. 1699-1710.
- Shrivastava, P. (1995): Ecocentric Management for a Risk Society, in: Academy of Management Re-view, Jg. 20, Nr. 1, S. 118-137.
- Siemens (2012): Perspektiven – Produktivität und Effizienz verbinden, Erlangen.
- Statistisches Bundesamt (2014): Nachhaltige Entwicklung in Deutschland – Indikatorenbericht 2014, Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (2017): Nachhaltige Entwicklung in Deutschland – Indikatorenbericht 2016. Online verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltoekonomischeGesamtrechnungen/Umweltindikatoren/IndikatorenPDF_0230001.pdf?__blob=publicationFile, Stand: 07.03.2017.

- Sucky, E./Gampl, M./Ruh, A./Stelzer, N./Weidinger, J. (2016): Industrie 4.0: Marketingkampagne oder Revolutionsbeginn?, in: Sucky, E./Werner, J./Kolke, R./Biethahn, N. (Hrsg.): Mobility in a Globalised World 2015, Bamberg, S. 238-257.
- United Nations (2007): Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies, New York.
- VDMA (2015): Industrie 4.0 konkret – Lösungen für die industrielle Praxis, Frankfurt.
- Windelband, L. (2014): Zukunft der Facharbeit im Zeitalter „Industrie 4.0“, in: Journal of Technical Education, Jg. 2, H. 2, S. 138-160.
- Windelband, L. (2016): Industrie 4.0 ein Assistenzsystem für die Facharbeit in der Produktion?, in: Frenz, M./Schlick, C./Unger, T. (Hrsg.): Wandel der Erwerbsarbeit, Berlin, S. 77-93.
- Wolter, M./Mönnig, A./Hummel, M./Schneemann, C./Weber, E./Zika, G./Helmrich, R./Maier, T./Neuber-Pohl, C. (2015): IAB-Forschungsbericht 8/2015: Industrie 4.0 und die Folgen für Arbeitsmarkt und Wirtschaft. Online verfügbar unter <http://doku.iab.de/forschungsbericht/2015/fb0815.pdf>, Stand: 06.08.2016.
- World Commission on Environment and Development (1987): Our common future, Oxford.
- World Economic Forum (2016): The Future of Jobs. Employment, Skills and Workforce Strategies for the Fourth Industrial Revolution. Online verfügbar unter http://www3.weforum.org/docs/WEF_Future_of_Jobs.pdf, Stand: 27.09.2016.