

## Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 – Potenziale für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) des verarbeitenden Gewerbes –

Liselotte Schebek

1.	Die Studie <i>Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 – Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes</i> .....	67
2.	Methodisches Vorgehen zur Ermittlung der Ressourceneffizienz.....	67
3.	Ergebnisse aus den betrieblichen Fallstudien.....	70
4.	Untersuchung von Ressourceneffizienzpotenzialen für Maßnahmen der Industrie 4.0 .....	71
5.	Handlungsempfehlungen .....	75
6.	Ausblick.....	76
7.	Quellen .....	77

Das Schlagwort Industrie 4.0 wurde erstmals geprägt auf der Hannover Messe im Jahr 2011 [3] und beschreibt die Erwartung, dass die laufende Transformation hin zur Digitalisierung weite Bereiche der Gesellschaft, vor allem aber der Wirtschaft, zu einer vierten industriellen Revolution führen wird. Grundlage dieser Transformation zur Industrie 4.0 ist eine Verbindung von konventionellen physischen Elementen der Produktion, d.h. von Anlagen, Maschinen, Werkstücken und Produkten der Industrie, mit digitalen Technologien, vor allem cyber-physikalischen Systemen (CPS) [4]. Die durchgängige Nutzung der durch CPS dezentral erfassten Daten über das Internet führt zu Netzwerken mit (kontinuierlichem) Austausch von Informationen. Von den hierdurch entstehenden innovativen Produktions- und Wertschöpfungsketten werden weitreichende Systeminnovationen erwartet<sup>1</sup> [16] und ein zusätzliches Wirtschaftswachstum, welches für Deutschland auf 200 bis 425 Milliarden EUR bis zum Jahr 2025 geschätzt wird [4].

---

<sup>1</sup> *Systeminnovationen sind technologisch basierte Innovationen, die sich in wirtschaftlich tragfähige und gesellschaftlich akzeptierte Produkte oder Dienstleistungen umsetzen lassen, wenn es gelingt, die notwendigen Komponenten und Kompetenzen in funktionierende Systemarchitekturen einzubinden. Sie überwinden organisatorische und fachliche Grenzen, sind geprägt durch ein funktionierendes Zusammenwirken unterschiedlicher Stakeholder entlang von Wertschöpfungsprozessen und ermöglichen Geschäftsmodelle, die erst durch die Akzeptanz der relevanten Akteure und Akteurinnen zum Erfolg geführt werden können.*

Auf der anderen Seite ist Digitalisierung auch mit der Vorstellung einer Dematerialisierung verbunden, die einen Kerngedanken der Nachhaltigkeitspolitik darstellt [4, 19]. Dematerialisierung durch Industrie 4.0 kann den Ersatz realer Objekte durch virtuelle Objekte bedeuten, beispielsweise von Prototypen durch digitale Modelle. Vor allem aber kann eine Dematerialisierung durch Effizienzsteigerungen bewirkt werden, die zu einer Entkopplung zwischen Wertschöpfung und Ressourcenverbräuchen führen. Die Digitalisierung in der Industrie kann prinzipiell auf verschiedenen Ebenen der Wertschöpfungskette zu Effizienzsteigerungen mit Verringerung von Material- und Energieverbräuchen führen. Für Bearbeitungsprozesse kann beispielsweise durch den Einsatz von optimierten Steuerungstechnologien eine verbesserte Maschinenauslastung erfolgen. Für Produkte kann durch intelligentere Wartungszyklen und einem vorausschauenden Austausch von Verschleißteilen eine Verlängerung der Lebensdauer bewirkt werden. In einer langfristigen Perspektive kann die detaillierte Kennzeichnung von Produktbestandteilen und Materialien in einer digitalen Lebenszyklusakte Grundlage für zielgerichtete Recyclingprozesse zur Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen sein.

Durch oben genannte Möglichkeiten in Verbindung mit weitgehenden Systeminnovationen, die durch das Konzept Industrie 4.0 realisierbar sind, werden erhebliche Potenziale zur Ressourceneinsparung erwartet. Erste Studien beziffern diese auf bis zu 50 Prozent [22, S. 5]. Entsprechende Schätzungen beziehen sich bislang aber lediglich auf die gesamtwirtschaftliche Ebene, ohne dass die spezifischen Potenziale bestimmten Maßnahmen oder Innovationen zugerechnet werden könnten. Darüber hinaus wird in bisherigen Studien kaum beleuchtet, dass auch die digitale Transformation selbst neue und zusätzliche Ressourcen benötigt. Insbesondere zwei Aspekte sind hier von Bedeutung. Zum einen benötigt der Betrieb von Hardware und Software elektrische Energie. In Deutschland betrug der durch Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) bedingte Stromverbrauch im Jahr 2014 mit etwa 57,2 TWh bereits 10 Prozent des gesamten Stromverbrauchs, von welchem etwa 9,6 TWh auf die Industrie entfiel. Nach Schätzungen der Bundesregierung wird sich speziell der Strombedarf von Rechenzentren und Telekommunikationsnetzen bis 2020 gegenüber dem Jahr 2007 verdoppeln [7]. Zum anderen beruht die digitale Transformation auf der materiellen Basis der für die CPS notwendigen hochspezialisierten Komponenten, deren Funktion auf spezifischen Materialien und Elementen beruht. Damit trägt die Digitalisierung zur Problematik des Verbrauchs sogenannter kritischer Rohstoffe<sup>2</sup> bei, der zu einer steigenden Vulnerabilität der Wirtschaft durch Risiken in den Lieferländern führt, aber auch zu Umweltbelastungen, die mit der Förderung dieser Rohstoffe verbunden sind.

Insgesamt lässt sich daher einerseits sagen, dass die digitale Transformation große Chancen zur Steigerung der Ressourceneffizienz bietet, dass sie aber andererseits auch spezifische Risiken mit sich bringen kann. Allgemeine gesamtwirtschaftliche Aussagen sind für eine zielgerichtete Nutzung dieser Chancen nicht ausreichend. Vielmehr ist eine differenzierte Betrachtung auf unterschiedlichen Wirtschaftsebenen bis hin zu konkreten Lösungen und Prozessen auf der betrieblichen Ebene nötig.

<sup>2</sup> Kritische Rohstoffe: wirtschaftlich bedeutsame Rohstoffe, deren Versorgung als kritisch angesehen wird

## 1. Die Studie *Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 – Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes*

Vor diesem Hintergrund beauftragte das VDI Zentrum Ressourceneffizienz, das im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit arbeitet, in Zusammenarbeit mit dem Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, dem Hessischen Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung sowie dem Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz eine Studie zur Untersuchung der Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 mit einem Fokus auf kleine und mittlere Unternehmen (KMU). Die Studie mit dem Titel *Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0. – Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes* [15] wurde von einem Konsortium aus Wissenschaftlern der TU Darmstadt (Fachgebiet Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft, Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen, Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion), des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung in Stuttgart sowie der Fraunhofer-Projektgruppe Prozessinnovation, Bayreuth, und des Deutschen Forschungszentrums für Künstliche Intelligenz, Kaiserslautern durchgeführt.

Mit der Studie sollte erstmals eine systematische Untersuchung der Auswirkungen der digitalen Transformation auf die Ressourceneffizienz in der Industrie durchgeführt werden. Bekanntermaßen verbraucht das verarbeitende Gewerbe in Deutschland große Mengen an Materialien und Strom. Eine Steigerung der Ressourceneffizienz stellt daher einen wichtigen Faktor für die Wettbewerbsfähigkeit dar. Der Fokus der Studie wurde dabei bewusst auf kleine und mittlere Unternehmen gelegt, sowohl wegen ihrer Bedeutung für die deutsche Wirtschaft, aber auch mit der Motivation, diese Gruppe von Unternehmen bei der Umsetzung ihrer digitalen Transformation in Verbindung mit einer Steigerung der Ressourceneffizienz zu unterstützen.

Diese Studie entwickelte ein systematisches methodisches Vorgehen zur Ermittlung der Ressourceneffizienz, untersuchte zehn Fallstudien in realen Betrieben der beteiligten Bundesländer, identifizierte einzelne Maßnahmen der Industrie 4.0, untersuchte deren Ressourceneffizienzpotenziale und leitete aus den gewonnenen Erkenntnissen Handlungsempfehlungen ab.

## 2. Methodisches Vorgehen zur Ermittlung der Ressourceneffizienz

Als Grundlage der methodischen Vorgehensweise ist der Begriff der Ressourcen klar zu definieren. In der Betriebswirtschaft werden hierunter alle ökonomisch notwendigen Faktoren für die Produktion verstanden, vor allem Betriebsstoffe, Werkstoffe, Kapital, Personal, Know-how und Zeit. Im Unterschied dazu wurde eine Definition des Begriffs der natürlichen Ressourcen von Seiten der europäischen Politik entwickelt. [11], die auch der deutschen Ressourceneffizienzpolitik zu Grunde liegt und wie folgt lautet [18, 23]:

*Ressource, die Bestandteil der Natur ist. Hierzu zählen erneuerbare und nicht erneuerbare Primärrohstoffe, physischer Raum (Fläche), Umweltmedien (Wasser, Boden, Luft), strömende Ressourcen (z.B. Erdwärme, Wind-, Gezeiten- und Sonnenenergie) sowie die Biodiversität. Es ist hierbei unwesentlich, ob die Ressourcen als Quellen für die Herstellung von Produkten oder als Senken zur Aufnahme von Emissionen (Wasser, Boden, Luft) dienen.<sup>3</sup>*

Diese Definition wird auch in der VDI-Richtlinie 4800 verwendet, die erstmals ein methodisches Vorgehen zur Ermittlung von Ressourceneffizienz beschreibt. Bemerkenswert an dieser Definition ist, dass sie nicht nur die in die Wirtschaft eingehenden Ressourcen (insbesondere Rohstoffe) umfasst, sondern dass auch die Senkenfunktion der Natur zur Aufnahme von Emissionen in die Umweltkompartimente Boden, Luft und Wasser als Ressource Berücksichtigung findet. Damit ist diese Definition erheblich breiter als die umgangssprachlich häufig verwendete Gleichsetzung des Begriffs Ressourcen mit dem Verbrauch von Rohstoffen.

Die VDI-Richtlinie 4800 stellt die allgemeine methodische Grundlage der Studie dar. VDI 4800 Blatt 1 Ressourceneffizienz – Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien [24] beschreibt den Rahmen für die Ermittlung von Ressourceneffizienz und wird gegenwärtig durch weitere Teile zu spezifischen Aspekten (z.B. Versorgungsrisiken von Rohstoffen) ergänzt.<sup>4</sup>

Ausschlaggebend für die Auswirkungen möglicher Digitalisierungsmaßnahmen auf die Ressourceneffizienz sind jeweils der berücksichtigte Systemrahmen (inner- oder außerbetrieblicher Rahmen) sowie die Ebene in der Wertschöpfungskette (Einkauf, Fertigung, Lager, usw.). Grundlegendes Prinzip ist der Lebensweggedanke. Dabei wird der gesamte Lebensweg von Produkten beginnend mit der Rohstoffgewinnung, über die Herstellung, die Distribution, die Nutzung bis hin zur Verwertung und Beseitigung betrachtet. Damit müssen im Systemrahmen auch alle relevanten Effekte außerhalb eines Unternehmens berücksichtigt werden. Für die Untersuchungen des Lebenswegs verweist die VDI 4800 auf die Methode der Ökobilanz (Life Cycle Assessment, LCA) mit den einschlägigen Normen DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044<sup>5</sup>. Der zentrale Begriff der *Ressourceneffizienz* wird in der VDI 4800 wie folgt beschrieben: *Verhältnis eines bestimmten Nutzens oder Ergebnisses zum dafür nötigen Ressourceneinsatz, wobei ein Nutzen durch eine Funktion (z.B. eines Produktes, einer Dienstleistung) erfüllt wird.* Der hier angesprochene *Nutzen* steht in Übereinstimmung mit der Methodik der Ökobilanz, in der alle Umweltbelastungen auf den Nutzen des untersuchten Produktsystems bezogen werden. Dieser wird in der Terminologie der Ökobilanz-Normen als Funktionelle Einheit bezeichnet.

<sup>3</sup> Umweltbundesamt: Glossar zum Ressourcenschutz. Dessau, 2012. Definition in Anlehnung an KOM (2005) 670: Thematische Strategie zur Nutzung natürlicher Ressourcen

<sup>4</sup> Zum Stand 12/2016 liegt als Gründruck vor: VDI 4800 Blatt 2 *Ressourceneffizienz: Bewertung des Rohstoffaufwands*

<sup>5</sup> DIN EN ISO 14040/14044: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen. 2009

Für die Untersuchung der betrieblichen Ressourceneffizienz muss nun ein Bezug zwischen den betrieblichen Ressourcen und den, im Systemrahmen des Lebenswegs zu ermittelnden, natürlichen Ressourcen gefunden werden. In der betrieblichen Praxis können nur die Verbräuche betrieblicher Ressourcen direkt gemessen und beeinflusst werden. Zielsetzung der Ressourceneffizienz ist aber die Verringerung des Verbrauchs an natürlichen Ressourcen. Als Schnittmenge zwischen den beiden Definitionen kann eine in der Studie als *materielle Ressource* bezeichnete Teilmenge der betrieblichen Ressourcen identifiziert werden, nämlich Materialien und Energie. Für einen Überblick über die wichtigsten Zusammenhänge zwischen natürlichen Ressourcen und den materiellen betrieblichen Ressourcen wurde in der Studie die in Tabelle 1 dargestellte Zuordnung erarbeitet.

Tabelle 1: Zuordnung natürlicher Ressourcen zu betrieblichen Ressourcen

Natürliche Ressourcen		Betriebliche Ressourcen			
nach UBA (2012)*		nach VDI 4800-1 (2016)	Bezeichnung	Einheit	Beispiele
Primärrohstoffe	Primärrohstoffe (erneuerbar, fossil)	Rohstoffe	Materialien, (Rohstoffe, Vorprodukte, Werkzeuge, Maschinen, Hilfs- und Betriebsstoffe)	mg, kg, t	z.B. Kunststoffe, Metalle, Chemikalien, Schmierstoffe, usw.
	Primärenergie-träger (erneuerbar, fossil)	Energie-ressourcen	Bedarf an elektr. und therm. Energie	kWh, MJ	Verbrauch elektrischer Energie und Wärme für bspw. Heiz- und Reinigungsvorgänge
Umweltmedien	Wasser	Wasser	Wasserverbrauch	l, m <sup>3</sup>	Trinkwasser und Brauchwasser für bspw. Reinigungs- und Kühlvorgänge
		Ökosystemleistung	Emissionen in Wasser	kg/m <sup>3</sup> , g/l	Verunreinigung des Wassers durch Schadstoffe
	Luft	Ökosystemleistung	Emissionen in die Luft	kg/m <sup>3</sup> , g/l	Verunreinigung der Luft durch Schadstoffe
Umweltmedien/ physischer Raum	Boden/ Fläche	Boden/ Fläche	Flächeninanspruchnahme	m <sup>2</sup> , ha	bebaute Flächen für Gebäude und Straßen, Agrar- und Forstfläche
		Ökosystemleistung	Emissionen in den Boden, beseitigte Abfälle	kg/m <sup>3</sup> , g/l	Verunreinigung der Fläche durch Schadstoffe in den Boden oder die Deponierung von Abfällen
strömende Ressourcen (z.B. Solar- u. Windenergie)	abgebildet über Primärenergie-träger (erneuerbar)	Energie-ressourcen	Bedarf an elektr. und therm. Energie	kWh, MJ	Verbrauch elektr. Energie und Wärme für bspw. Heiz- und Reinigungsvorgänge aus erneuerbaren Energieträgern
Biodiversität	abgebildet über Fläche/Boden	nicht berücksichtigt			

\* In Anlehnung an KOM 670: Thematische Strategie zur Nutzung natürlicher Ressourcen, 2005. Online abgerufen am: 20.12.2017 unter: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=LEGISSUM%3A128167>

Quelle: VDI ZRE: Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0. – Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes. 2017, online abgerufen am 17. Dez. 2017, <https://www.ressource-deutschland.de/themen/industrie-40/studie-industrie-40/?L=0>

Die Veränderungen der Verbräuche von Materialien und Energie durch die Digitalisierung auf der betrieblichen Ebene sollten so weit wie möglich im Rahmen der Untersuchungen der Fallstudien erfasst werden. Die hier gewonnenen Erkenntnisse werden in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben. Die entsprechenden Vorketten von Material- und Energieverbräuchen für Hard- und Software liegen jedoch außerhalb des Kenntnisbereichs von Betrieben und wurden daher durch eine ausführliche Literaturrecherche untersucht. In Bezug auf die Ermittlung der Aufwände sind, wie bereits erwähnt, die Rohstoffverbräuche für die Hardware-Komponenten während der Herstellungsphase und der Energiebedarf während der Herstellungs- und Nutzungsphase für Hard- und Software-Komponenten relevant. Die Literaturschau zeigt, dass Ökobilanzstudien zu Komponenten der digitalen Transformation bislang vorzugsweise zu konsumnahen Produkten, wie Laptops oder Smartphones, durchgeführt wurden. Obwohl sich hier einzelne Kenngrößen und Annahmen für Abschätzungen entnehmen ließen, muss gleichzeitig einschränkend angemerkt werden, dass durch die vergleichsweise geringe Zahl an Studien mit zum Teil schon einige Jahre zurückliegendem Erstellungszeitpunkt die aktuelle Vielfalt von Industrie 4.0-Komponenten nur punktuell abgebildet werden konnte. Insbesondere bestehen große Informationsdefizite hinsichtlich der Angaben zum Gehalt an kritischen Rohstoffen in Industrie 4.0-Komponenten.

Als interessante Einzelaspekte aus der Auswertung von Literatur zu ökobilanziellen Studien von IKT können wie folgt genannt werden:

- Der Energieverbrauch von Servern entfällt zu 5 Prozent auf die Herstellungsphase und zu 95 Prozent auf die Nutzungsphase. [10] Bei Endgeräten wie Laptops kann diese Verteilung allerdings deutlich variieren [2].
- Der direkte Energieverbraucher der Digitalisierung ist die Hardware. [14, S. 37.] Die Höhe des Stromverbrauchs wird aber maßgeblich von der jeweils angewendeten Software beeinflusst, die damit als eine wesentliche Stellschraube für Energieeffizienz von IKT-Anwendungen angesehen werden kann. [13]

Über Ökobilanzen einzelner Geräte und Komponenten wurden Studien zu gesamtwirtschaftlichen Abschätzungen des Energieverbrauchs von IKT ausgewertet. Als relevante aktuelle Entwicklungen zeigt sich hier, dass sich einerseits die Effizienz von Endgeräten wie Smartphones oder Notebooks erhöht und damit deren Anteil am gesamten Stromverbrauch sinkt. Andererseits ist mit dem gegenwärtigen Ausbau von Rechenzentren und Telekommunikationsnetzen für Internet und Cloud-Computing ein erheblicher Anstieg des Strombedarfs verbunden [5, S. 40 ff.].

### 3. Ergebnisse aus den betrieblichen Fallstudien

Untersucht wurden zehn Fallstudien von Unternehmen in den drei Branchen Maschinenbau, Kunststoff- und Elektroindustrie. Alle Unternehmen liegen im mittel- und süddeutschen Raum. Acht Unternehmen gehören der Gruppe der KMU im Sinne

der EU-Empfehlung 2003/361<sup>6</sup> an. [8] Bei den beiden anderen handelt es sich um Standorte größerer Unternehmen, die unter sachlichen Gesichtspunkten (Mitarbeiter, Umsatz, Bilanzsumme) jedoch mit KMU vergleichbar sind. Insgesamt lässt sich sagen, dass die untersuchten Unternehmen unterschiedlichen, aber mehrheitlich frühen Stadien der digitalen Transformation zuzuordnen sind. Dieser Befund steht in Übereinstimmung mit Erkenntnissen aus der Literatur, nach denen die überwiegende Anzahl kleiner und mittlerer Unternehmen erst am Beginn der digitalen Transformation steht.

Deutlich wurde, dass die Wichtigkeit der Digitalisierung für die Unternehmen hoch ist und sie diese als große Chance zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit sehen. Die Motivation zur Konzipierung und Umsetzung von Maßnahmen war primär durch die Prozessoptimierung oder durch damit einhergehende Zeitersparnisse motiviert. Die Unternehmen berichteten von einer Steigerung der Ressourceneffizienz, dies wurde jedoch überwiegend als ein positiver Nebeneffekt wahrgenommen und stellte nicht die ursprüngliche Zielsetzung der Maßnahmen dar. Damit einher geht, dass, obwohl alle befragten Unternehmen grundsätzlich angaben, Maschinen- und Prozessdaten in der Produktion zu erfassen, in keinem der Unternehmen Daten gezielt aufbereitet und genutzt werden, um Ressourcenverbräuche einzelner Prozesse sowie Prozessketten mittels der Möglichkeiten der Digitalisierung zu optimieren.

Das Thema Nachhaltigkeit ist für alle Unternehmen wichtig, Energie- und Umweltziele finden sich in der Unternehmenspolitik. Zur Verfolgung dieses Themas werden betriebliche Kenngrößen auf der Ebene des Standorts genutzt (z.B. der Stromverbrauch). Weitergehende Analyseinstrumente mit Bezug zu natürlichen Ressourcen, wie beispielsweise der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, sind den Unternehmen zwar bekannt, werden aber wegen ihrer größeren Komplexität in den meisten Fällen nicht selbst angewendet. Der Zusammenhang zwischen der Ressourceneffizienz, als ein Thema des Nachhaltigkeitsmanagements, und der digitalen Transformation wurde in den Unternehmen oft erst im Rahmen der Fallstudien hergestellt. Zwar wurden in den Gesprächen die Wechselwirkungen zwischen den beiden Handlungsfeldern positiv wahrgenommen. In der Unternehmensorganisation sind diese Bereiche aber überwiegend getrennt, so dass eine operative Basis für die Nutzung von Synergien bislang noch fehlt.

## 4. Untersuchung von Ressourceneffizienzpotenzialen für Maßnahmen der Industrie 4.0

Sowohl zur Definition des *Nutzens* im Sinne der VDI 4800/DIN EN ISO 14040 als auch für die Untersuchung der Fallstudien mittels Fragebögen und Interviews mussten klare Begrifflichkeiten für die Beschreibung der digitalen Transformation

<sup>6</sup> Nach der EU-Empfehlung 2003/361 zählt ein Unternehmen zu den KMU, wenn es nicht mehr als 249 Beschäftigte hat und einen Jahresumsatz von höchstens 50 Mio. EUR erwirtschaftet oder eine Bilanzsumme von maximal 43 Mio. EUR aufweist.



gefunden werden. Die im Rahmen der Studie durchgeführte umfassende Auswertung von Literatur zur Industrie 4.0 hatte gezeigt, dass gegenwärtig viele unterschiedliche Sichten und Begrifflichkeiten nebeneinander bestehen und eindeutige Definitionen oder Terminologien fehlen. Aus diesem Grund wurde in der Studie eine eigenständige Strukturierung von Maßnahmen der digitalen Transformation erstellt.

Tabelle 2: Generische Maßnahmen der digitalen Transformation

ID	Maßnahme	Beschreibung
M1	Vernetzung von Sensoren und Aktoren	Eine zentrale Grundvoraussetzung zur digitalen Wertschöpfung ist die digitale Anbindung von Sensoren und Aktoren. Diese definiert die Basis, um die Daten unterschiedlicher Sensoren und Aktoren über einen längeren Zeitraum zu überwachen und aufzuzeichnen, und auch um diese in einem integrierten Prozess in Kombination zu betrachten.
M2	Einsatz digitaler Objektgedächtnisse	Physische Objekte (Produkte, Maschinen) werden mit einem digitalen Gedächtnis ausgestattet. Relevante Daten werden im Gedächtnis hinterlegt und liegen direkt zugreifbar an der Maschine oder am Produkt vor.
M3	dezentrale Steuerung	Das intelligente Werkstück wird zum wichtigen Baustein im dezentral gesteuerten Fertigungs- und Wertschöpfungsnetzwerk. Es hat Kenntnisse über seine Eigenschaften und hält Informationen bereit, wie es gefertigt werden kann und was das Ziel der Fertigung ist. Somit kann es seinen eigenen Produktionsprozess steuern.
M4	Maßnahmen zur Werkerunterstützung und Assistenz	Assistenzsysteme können Werker (unter Zuhilfenahme mobiler Endgeräte) bei vielfältigen Aufgaben in der Fertigung und der Montage unterstützen. Softwaresysteme sprechen auf Basis der vernetzten Infrastruktur und der Auswertung der verfügbaren Sensorik Empfehlungen zur Gestaltung des Produktionsprozesses aus.
M5	dynamisch kooperierende Systeme und Modularisierung	Durch modular gekapselte Funktionalität können Fertigungsanlagen leicht um neue oder veränderte Anlagenteile ergänzt werden, Interoperation zwischen zwei oder mehr Beteiligten mit minimalem Arbeitsaufwand herstellen, ändern oder auflösen.
M6	Einführung und Verwendung von Ortungs- und Lokalisierungssystemen	Mithilfe von Ortungs- und Lokalisierungssystemen sind Maschinen und Anlagenteile in einer Produktionsstätte leichter zu finden. Auch die gefertigten Produkte können leichter lokalisiert und in den Fertigungsauftrag integriert werden.
M7	Zustandsüberwachung	Verschiedene Betriebszustände von Anlagen und Prozessen werden auf Basis erfasster Daten und mit Hilfe geeigneter Softwarelösungen kontinuierlich analysiert sowie Abweichungen markiert und gemeldet. Unerwartete Systemausfälle sollen durch die konstante Überwachung und Analyse vermieden werden.
M8	prädiktive Wartung	Systeme zur prädiktiven Wartung sollen Maschinenfehler (z.B. Maschinenausfälle oder Störungen) entdecken, bevor sie überhaupt auftreten. Fehler sollen durch Instandhaltung oder frühzeitige Reparaturen verhindert werden.
M9	durchgängige Datenintegration	Die durchgängige Datenintegration und der einheitliche Zugriff auf Datenstrukturen ermöglicht die integrierte Betrachtung von Fertigung und Auftragsplanung. Zur Umsetzung agiler Produktionsprozesse ist eine vertikale Integration von Enterprise Resource Planning (ERP)-Systemen zwingend notwendig.
M10	virtuelle Produktentwicklung	Bei der virtuellen Produktentwicklung wird ein digitales, dreidimensionales Modell eines neuen Produktes im Computer entworfen. Das virtuelle Modell kann beliebig modifiziert, getestet und durch Simulationen optimiert werden. Kostengünstige physische Prototypen lassen sich auf Basis des Modells mittels neuer Fertigungsverfahren wie 3D-Druck erzeugen.
M11	Cloud-Computing	Einzelne Arbeitsbereiche (z.B. Programme, Softwarepakete, Speicherplatz, Rechenkapazität) werden nicht mehr auf der Festplatte, sondern über das Internet oder lokale Netzwerke (der Cloud) bereitgestellt.

Quelle: Eigene Darstellung nach VDI ZRE: Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0. – Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes. 2017, online abgerufen am 17. Dez. 2017, <https://www.ressource-deutschland.de/themen/industrie-40/studie-industrie-40/?L=0>



Unter dem Begriff der *Maßnahme* wurden dabei solche Kombinationen digitaler Technologien, Komponenten und Prozesse verstanden, die in der Praxis häufig anzutreffen sind und betrieblichen Ansprechpartnern bekannt sind. Orientiert an gängigen Terminologien der digitalen Transformation wurde eine Liste von elf generischen Maßnahmen der digitalen Transformation erarbeitet (Tabelle 2).

In den Fallstudien wurde die Umsetzung der elf Maßnahmen erwartungsgemäß in unterschiedlichen Kombinationen und Ausprägungen vorgefunden. Die Untersuchung der Ressourceneffizienzpotenziale bezog sich daher auf diese als *Praxisanwendungen* bezeichneten realen Kombinationen von Maßnahmen in den untersuchten Betrieben.

Der Begriff des Ressourceneffizienzpotenzials ist in VDI 4800 nicht explizit definiert, er kann aber sinngemäß als eine mögliche Verbesserung der Ressourceneffizienz interpretiert werden. Entsprechend zielte die Analyse der Ressourceneffizienzpotenziale (REP) auf die Ermittlung der Veränderungen der Ressourceneffizienz durch die Praxisanwendungen. Als Informationsgrundlage zur Ermittlung betrieblicher REP dienten die Angaben aus den Fallstudien. Wie bereits erwähnt, führen die Unternehmen derzeit jedoch keine gezielte Erhebung von prozessbezogenen Daten mit dem Ziel der Quantifizierung von Ressourcenverbräuchen durch, sodass die eigentlich benötigten Daten fehlten. Ersatzweise wurden den Unternehmen in den Fragebögen Kategorien für die mögliche Größenordnung von Veränderung der Ressourcenverbräuche vorgegeben, in die sie die möglichen Einsparungen ihres Unternehmens durch die realisierten Praxisanwendungen der Digitalisierung einstufen sollten. Eine solche Selbsteinschätzung in Form der vorgegebenen Kategorien wurde für sechs der zehn untersuchten Praxisanwendungen gegeben. Überwiegend wurden hier Einsparungen bis 25 Prozent genannt. Weiterführende Informationen zur Konkretisierung von Einsparungen lagen nicht vor, so fehlten z.B. Angaben zur Verringerung von innerbetrieblichen Transportdistanzen oder generell zu außerbetrieblichen Effekten. Gefragt wurde ebenso nach den innerbetrieblichen Aufwänden der Digitalisierung, z.B. in Form von Geräten oder Sensoren. Auch hier lagen nur wenige Angaben mit ungefähren Schätzungen vor. Insgesamt wurde deutlich, dass die Datengrundlagen zur Quantifizierung von Effekten der digitalen Transformation auf die betriebliche Ressourceneffizienz derzeit noch unzureichend sind. Dies betrifft einerseits die Einsparungen an Verbräuchen von Materialien und Energie, aber auch die ressourcenbezogenen Aufwände der Digitalisierung. D.h. der Mengenbedarf an spezifischer Hardware und der damit verbundene Verbrauch elektrischer Energie, sind auf betrieblicher Ebene weitestgehend unbekannt.

Die erarbeitete Vorgehensweise zur Ermittlung von REP wurde daher in Form einer qualitativen Analyse umgesetzt und die Ergebnisse in Schaubildern für den jeweiligen Systemrahmen der Praxisanwendung dargestellt. Ein Beispiel für die Praxisanwendung eines sogenannten Enterprise Resource Planning-Systems (ERP-System)<sup>7</sup> zeigt Bild 1. [20, S. 66]

<sup>7</sup> ERP-Systeme bilden die Basis für die Informationsverarbeitung im Unternehmen, indem sie integrierte Softwarelösungen für Administration sowie Planung und Steuerung der betrieblichen Wertschöpfungsprozesse beinhalten.

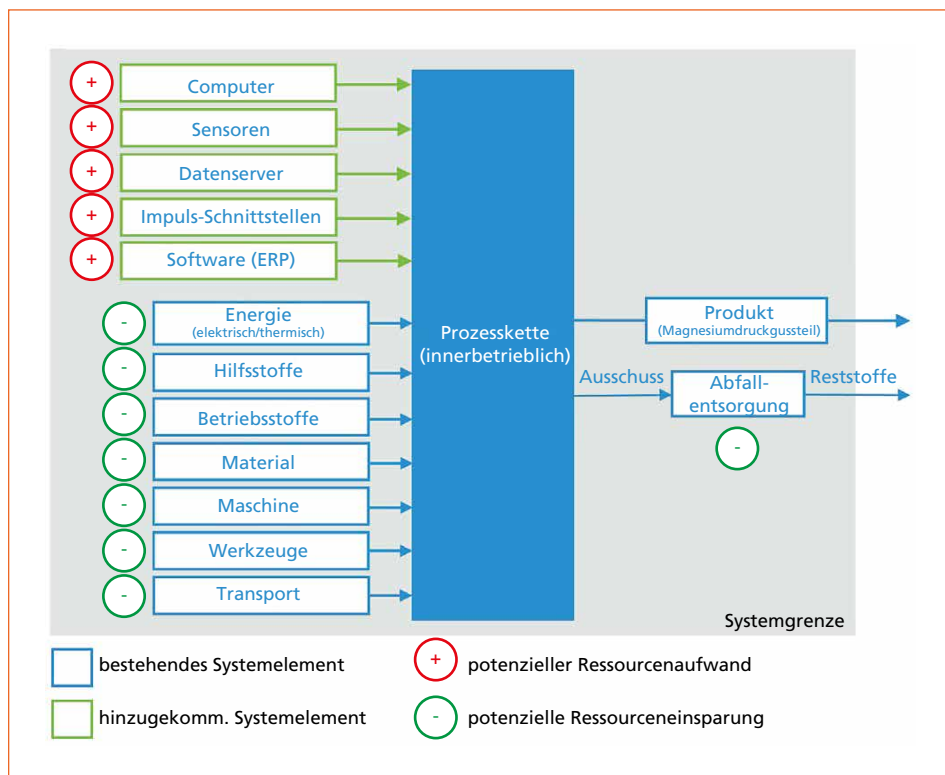


Bild 1: Systemrahmen der Praxisanwendung 1: Optimierte Geschäftsprozesse durch ein Enterprise Resource Planning-System

Quelle: VDI ZRE: Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 – Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes. 2017, online abgerufen am 17. Dez. 2017, <https://www.ressource-deutschland.de/themen/industrie-40/studie-industrie-40/?L=0>

Aus der Analyse der Auswertung der Praxisanwendungen ließen sich sechs Einspar-effekte durch Maßnahmen der digitalen Transformation identifizieren: (1) Vermeidung von Abfällen, (2) Einsparung von elektrischer Energie, (3) Verringerung der Fehlerrate und der damit einhergehenden Ausschussmenge, (4) Einsparung von Lagerraum, (5) Verringerung des Materialeinsatzes und (6) Einsparung von (innerbetrieblichen) Trans-porten. Diese Effekte wurden den unterschiedlichen Praxisanwendungen zugeordnet und damit der Einfluss auf die Ressourceneffizienz charakterisiert. Die Darstellung der Effekte folgte hier aus der betrieblichen Perspektive. So wurden beispielsweise die Einsparung von Material und die Verringerung der Abfallmenge als getrennte Effekte aufgeführt, obwohl diese aus einer übergreifenden stoffstrombezogenen Sicht direkt zusammenhängen.

In einem zweiten Schritt wurden die Erkenntnisse aus den betrieblichen Fallstudien in zwei beispielhaften Analysen zu generischen Abschätzungen von Ressourceneffizienzpotenzialen mit Daten aus Literatur und Statistik zusammengeführt und für Deutschland hochgerechnet.

Im ersten Beispiel handelt es sich um eine Maßnahme zur Reduzierung des Energieverbrauchs für die Druckluftherzeugung. Die Maßnahme ist gekennzeichnet durch eine optimierte Druckluftsystemüberwachung mittels der *Druckluft-Leckage-App*. Während sich die betrieblichen Einsparungen durch die erhebliche Menge an eingesparter elektrischer Energie für die zusätzliche Druckluftherzeugung bemerkbar machten, beschränkten sich die für die Realisierung der Praxisanwendung benötigten Aufwände auf die Hardwarekomponenten (Smartphone, Computer und Sensoren). Als Ergebnis der Abschätzung wurden für den Betrachtungszeitraum von einem Jahr Netto-Einsparungen für Deutschland in Höhe von 0,86 bis 3,03 TWh Endenergie (bzw. 462.508 bis 1.618.776 Tonnen CO<sub>2</sub>-Emissionen) ermittelt. Im Beispiel der Praxisanwendung *Druckluft-Leckage-App* kann daher auch unter den in der Abschätzung verwendeten konservativen Annahmen mit erheblichen Einsparungen natürlicher Ressourcen, in diesem Fall durch Minderung des Energieverbrauchs und damit Reduzierung des Verbrauchs fossiler Energieträger, gerechnet werden.

Im zweiten Beispiel handelt es sich um die Praxisanwendung *Data on a Stick*, bei welcher durch den Einsatz von Datenträgern (USB-Sticks) innerhalb einer Wafer-Produktionslinie (Mikroelektronik) die Umstellung auf einen papierlosen Fertigungsprozess ermöglicht wurde. Die Einsparungen, welche durch die Umsetzung der Praxisanwendung erzielt werden konnten, lagen vor allem in der Menge an eingesetztem Dokumentationsmaterial – im spezifischen Fall der Wafer-Fertigung: Spezialpapier für Reinraumanwendungen. Zudem konnte nach Aussage des Unternehmens durch die Eingliederung der Datenträger und der dadurch möglichen Echtzeitsteuerung des Fertigungsprozesses der Bedarf an elektrischer Energie der Fertigungsline reduziert werden. Die Aufwände liegen auf Seiten des Unternehmens maßgeblich in der Nutzung von USB-Sticks, dem anteiligen Gebrauch eines Servers sowie in der Nutzung eines Computers, inklusive der jeweils benötigten Software. Im Ergebnis konnte hier ermittelt werden, dass Einsparungen und Aufwendungen in gleicher Größenordnung vorliegen. Dieses Beispiel macht deutlich, dass Maßnahmen der digitalen Transformation nicht zwingend zu Einsparungen führen, sondern eventuell erlangte Einsparungen einer Ressource (z.B. Papier) durch notwendige Aufwendungen (z.B. erhöhter Energiebedarf) in Summe aufgewogen werden können.

## 5. Handlungsempfehlungen

Die in der Studie formulierten Handlungsempfehlungen, wurden, unterschieden nach den Adressaten KMU, Politik und Wissenschaft, dargestellt.

Im Hinblick auf die Unterstützung von Unternehmen zur Nutzung von Chancen der digitalen Transformation durch die Optimierung von Fertigungsprozessen und Produkten, wurden in der Studie verschiedene Hilfsmittel bereitgestellt. So können Unternehmen sogenannte Readiness-Checks durchführen, um den bestehenden Digitalisierungsstand im Unternehmen abschätzen und angepasst an ihren Entwicklungsstand geeignete Maßnahmen auswählen zu können. Weiterhin wurde in der

Studie das Werkzeug *ReSET* entwickelt, das zeigt, wie ausgehend vom vorhandenen Digitalisierungsstand eine Zustandsüberwachung (Condition Monitoring) bezüglich der eingesetzten Ressourcen schrittweise entwickelt werden kann.

Handlungsempfehlungen an die Politik betreffen zum einen Beratungs- und Unterstützungsangebote für Unternehmen. Bereits bestehende Beratungsangebote der Länder bezüglich Energie- bzw. Ressourceneffizienz und PIUS können erweitert oder beispielsweise mit den Mittelstand 4.0-Kompetenzzentren kombiniert werden. Mit der stärkeren Zusammenarbeit dieser Einrichtungen könnte die sachliche Verknüpfung der beiden Themen *Ressourceneffizienz* und *Industrie 4.0* gefördert werden. Ein wichtiges Thema für die Politik ist auch der erwartete Anstieg des Energieverbrauchs durch die Nutzung von Cloud- und Internetdiensten. Hier sollte die Politik Label- bzw. Kennzeichnungssysteme für IKT-Hersteller oder Anbieter von Dienstleistungen des Internets entwickeln, welche den Energieverbrauch dieser Dienste transparent ausweisen. In diesem Kontext sollte auch die Forschung für die Entwicklung von für Unternehmen geeigneter Indikatoren und Instrumente zur Erfassung von natürlichen Ressourcenverbräuchen gefördert werden. Diese Indikatoren könnten im Zusammenspiel mit Label- und Kennzeichnungssystemen auch in Forschungsprojekten dazu beitragen, mögliche gesamtwirtschaftliche Aufwände durch die digitale Transformation besser einschätzen zu können.

Aufgrund der Komplexität der Thematik Digitalisierung und Ressourceneffizienz besteht noch ein erheblicher Forschungsbedarf. Mit der Bereitstellung intelligenter Methoden zur Datenerfassung, -auswertung und -präsentation (selbstlernende Algorithmen) könnte die Wissenschaft den Weg zu sich selbständig optimierenden Prozessen und Anlagen, auch in Bezug auf die Ressourcenverbräuche, ebnen. Dabei spielen durch Digitalisierungsmaßnahmen generierte Daten eine wichtige Rolle. Zudem sollte der Transfer von Forschungsergebnissen aus Technologiedemonstratoren in die Unternehmen verbessert werden. Wissenschaftlichen Institutionen kommt hier eine wesentliche Rolle zu, ihre aus der Forschung gewonnenen Erkenntnisse beispielsweise in Form von Technologiedemonstratoren in die Anwendung der Industrie zu bringen. Da die Auswirkungen von Industrie 4.0 die Systemgrenzen des Betriebes (Kunden, Lieferanten, usw.) überschreiten, sind des Weiteren Untersuchungen entlang der Wertschöpfungskette unerlässlich, um mögliche Rebound-Effekte, aber auch Vernetzungsmöglichkeiten der Wertschöpfungsnetzwerke hinsichtlich industrieller Symbiosen zu identifizieren. Auch sollten die Chancen der Digitalisierung dahingehend genutzt werden, schon während des Produktentwicklungsprozesses gezielt auf den notwendigen Ressourceneinsatz anhand einer effizienten Bewertung des Ressourcenverbrauchs einzuwirken. So können beispielsweise schon in der Konzeptionsphase die Auswirkungen von Produktvarianten auf die Recyclingfähigkeit eines Produktes genau analysiert werden.

## 6. Ausblick

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine große inhärente Chance der digitalen Transformation gerade darin liegt, mit Hilfe der neuen informationstechnischen Möglichkeiten einfach und kostengünstig spezifische Daten zum Ressourcenverbrauch

auf der betrieblichen Ebene zu generieren. Verbunden mit der Entwicklung von Informationsangeboten zu außerbetrieblichen Verbräuchen, beispielsweise dem Energieaufwand für Internet-Dienste, könnte Unternehmen damit zukünftig eine strategische Planungsgrundlage zur Verbesserung der Ressourceneffizienz zur Verfügung gestellt werden. Methodische Grundlagen und beispielhafte Anwendungen wurden mit der Studie *Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 – Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes* veröffentlicht.

Zukünftige Forschungsprojekte, die unter anderem an der TU Darmstadt unter der Nutzung der produktionstechnischen Umgebung der 2016 eröffneten ETA-Fabrik<sup>8</sup> vorgesehen sind, sollen weitere Bausteine zur betrieblichen Optimierung der Ressourceneffizienz erarbeiten. [17]

## 7. Quellen

- [1] AG Energiebilanzen: Energieflussbild (vereinfacht in Mio. Tonnen SKE) 2015, Arbeitsgruppe Energiebilanzen, online abgerufen am 13. Febr. 2017, <http://www.ag-energiebilanzen.de/9-0-energieflussbilder.html>
- [2] Andrae, A. S. G.; Andersen, O.: Life cycle assessments of consumer electronics — are they consistent? *International Journal of Life Cycle Assessment*. 8. Juli 2010, abgerufen am 17. Dez. 2017, [www.researchgate.net/publication/224777494\\_Life\\_cycle\\_assessments\\_of\\_consumer\\_electronics-are\\_they\\_consistent\\_Int\\_J\\_Life\\_Cycle\\_Assess](http://www.researchgate.net/publication/224777494_Life_cycle_assessments_of_consumer_electronics-are_they_consistent_Int_J_Life_Cycle_Assess)
- [3] Bischoff, J.: Erschließen der Potenziale der Anwendung von *Industrie 4.0* im Mittelstand. agiplan GmbH; Fraunhofer IML; ZENIT GmbH, Mülheim an der Ruhr, 2015
- [4] Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): Zukunftsbild Industrie 4.0., Bonn, 2013, verfügbar als PDF unter: [www.bmbf.de/pub/Zukunftsbild\\_Industrie\\_4.0.pdf](http://www.bmbf.de/pub/Zukunftsbild_Industrie_4.0.pdf)
- [5] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland – Abschlussbericht. 2015, abgerufen am 17. Dez. 2017 <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/entwicklung-des-ikt-bedingten-strombedarfs-in-deutschland-abschlussbericht.html>
- [6] Destatis: Kennzahlen der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes 2014, online. Statistisches Bundesamt (Hrsg.)
- [7] Deutscher Bundestag: Energieeffizienz bei Breitbandtechnologien. online. Deutscher Bundestag, 26. Okt. 2011, Drucksache 17/7472, abgerufen am 17. Dez. 2017, [dipbt.bundestag.de/dip21/btd/17/074/1707472.pdf](http://dipbt.bundestag.de/dip21/btd/17/074/1707472.pdf)
- [8] Europäische Kommission (EU): Empfehlung der Kommission vom 6. Mai 2003 betreffend die Definition der Kleinstunternehmen sowie der kleinen und mittleren Unternehmen (2003/361/EG (2003)). 20. Mai 2003
- [9] Europäische Kommission (EU): Große Herausforderung für die Industrie der EU: 20 kritische Rohstoffe (Pressemitteilung), online abgerufen am 17. Dez. 2017, [europa.eu/rapid/press-release\\_IP-14-599\\_de.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_IP-14-599_de.htm)

<sup>8</sup> Das Energieeffizienz-, Technologie- und Anwendungszentrum (ETA-Fabrik) stellt eine repräsentative Produktionsanlage für die Metallbearbeitung (Zerspanungs-, Reinigungs- und Wärmebehandlungsprozesse) dar. Innerhalb der Modellfabrik werden verschiedene interdisziplinäre Ansätze zur Reduktion des Energieverbrauchs und der Lastflexibilisierung untersucht und im Rahmen des Forschungs- bzw. Demonstrationsgebäudes umgesetzt.

- [10] Europäische Kommission (EU): Preparatory study for implementing measures of the Ecodesign Directive 2009/125/EC – DG ENTR Lot 9 – Enterprise servers and data equipment. Task 5: Environment & Economics. Final Report, Jul. 2015, online. Bio by Deloitte, Fraunhofer IZM
- [11] eurostat: Natural resource concepts. online abgerufen am 17. Dez. 2017, <http://ec.europa.eu/eurostat/web/environmental-data-centre-on-natural-resources/overview/natural-resource-concepts>
- [12] Fostering Industrial Symbiosis for a Sustainable Resource Intensive Industry across the extended Construction Value Chain (FISSAC): Was ist industrielle Symbiose? online abgerufen am 7. April 2017, <https://fissacproject.eu/de/was-ist-industrielle-symbiose/>
- [13] Green House Gas Protocol (GHGP): ICT Sector Guidance built on the GHG Protocol Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard, Chapter 6: Guide for assessing GHG emissions related to Software. online abgerufen am 18. Dez. 2017, <http://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/GHGP-ICTSG%20-%20ALL%20Chapters.pdf>
- [14] Hilty, L. M.; Lohmann, W.; Behrendt, S.; Evers-Wölk, M.; Fichter, K.; Hintemann, R.: Grüne Software. Schlussbericht zum Vorhaben: Ermittlung und Erschließung von Umweltschutzpotenzialen der Informations- und Kommunikationstechnik (Green IT). Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin, 2015
- [15] <https://www.ressource-deutschland.de/themen/industrie-40/studie-industrie-40/?L=0>
- [16] Institut für Innovation und Technik: Systeminnovationen. 2016, online abgerufen am 17. Dez. 2017, [www.iit-berlin.de/de/themenfelder/systeminnovationen](http://www.iit-berlin.de/de/themenfelder/systeminnovationen)
- [17] Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW): ETA-Fabrik – Energieeffizienz weitergedacht. online abgerufen am 20. Dez. 2017, [http://www.ptw.tu-darmstadt.de/landingpage\\_ptw/forschung\\_ptw\\_2/gruppen\\_ptw\\_1/umweltgerechteproduktion\\_ptw\\_1/projekte\\_up\\_1/eta\\_fabrik\\_afp\\_up/etafabrik\\_afp\\_up.de.jsp](http://www.ptw.tu-darmstadt.de/landingpage_ptw/forschung_ptw_2/gruppen_ptw_1/umweltgerechteproduktion_ptw_1/projekte_up_1/eta_fabrik_afp_up/etafabrik_afp_up.de.jsp)
- [18] KOM 670: Thematische Strategie zur Nutzung natürlicher Ressourcen, 2005, online abgerufen am: 20. Dez. 2017 unter: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=LEGISSUM%3A128167>
- [19] Lexikon der Nachhaltigkeit: Dematerialisierung. 2015, abgerufen am 17. Dez. 2017, [https://www.nachhaltigkeit.info/artikel/dematerialisierung\\_1121.htm](https://www.nachhaltigkeit.info/artikel/dematerialisierung_1121.htm)
- [20] Lichtblau, K.; Stich, V.; Bertenrath, R.; Blum, M.; Bleider, M.; Millack, A.; Schmitt, K.; Schmitz, E.; Schröter, M.: Industrie 4.0-Readiness. IMPULS-Stiftung für den Maschinenbau, den Anlagenbau und die Informationstechnik, Frankfurt, 2015
- [21] Neligan, A.; Schmitz, E.: Digitale Strategien für mehr Materialeffizienz in der Industrie. Ergebnisse aus dem IW-Zukunftspanel. IW-Report 3/2017. Institut der deutschen Wirtschaft, Köln
- [22] Plass, C.: Industrie 4.0 als Chance begreifen. Unity AG, Berlin, 2015, S. 5
- [23] Umweltbundesamt (UBA): Glossar zum Ressourcenschutz. Dessau-Roßlau, 2012
- [24] VDI 4800 Blatt 1: Ressourceneffizienz – Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien. (Entwurf). Juli 2014
- [25] VDI 4800-1: Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Ressourceneffizienz – Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Feb. 2016
- [26] VDI ZRE: Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 – Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes. 2017, online abgerufen am 17. Dez. 2017, <https://www.ressource-deutschland.de/themen/industrie-40/studie-industrie-40/?L=0>