



Grüne Industrie 4.0? Von Potenzialen zur Umsetzung

Siegfried Behrendt, Edgar Göll

Im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy

Projektleitung

adelphi research gemeinnützige GmbH

Alt-Moabit 91
14193 Berlin

T +49 (0)30-89 000 68-0
F +49 (0)30-89 000 68-10

www.adelphi.de
office@adelphi.de

Projektpartner

Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gemeinnützige GmbH

Clayallee 323
14169 Berlin

T: +49 (0)30 - 306 45 1000

www.borderstep.de
info@borderstep.de

IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gemeinnützige GmbH

Schopenhauerstr. 26
14129 Berlin

T: +49 (0) 30 80 30 88-0

www.izt.de
info@izt.de

Abbildung Titel: © Pixelbliss - shutterstock.com

Evolution2Green wird gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung.





Executive Summary

What contribution can the idea or concept “Industrie 4.0” make to a green economy?

Within the framework of project “Evolution2Green”, a future workshop that was held on the 22nd of June 2017 in Berlin, dealt with this key question. The future workshop was about determining and assessing approaches and potentials for a “green Industrie 4.0”. The future workshop’s results are a part of several elements of a roadmap, which includes questions, challenges and topics that are addressed to important stakeholders and political programs. The results should provide an impulse for a development of digitalization in industrial processes in accordance with the aims of a green economy, a green “Industrie 4.0”.

Until today “Industrie 4.0” has been an extensively technology-centered industrial policy vision. From a sustainability point of view “Industrie 4.0” is often limited to resource efficiency. There are only occasional touch points with the green economy debate. Both developments and debates are largely unconnected and run side by side.

Therefore, one of the main tasks is to bring together these previously separated discussions. This requires a collaboration of various stakeholders from politics, economy, associations, sciences and civil societies. For “Industrie 4.0” it is important to align with concrete and noticeable needs of company’s problems, especially SMEs, to guarantee a dissemination of “Industrie 4.0”. At the same time, the sustainability goals of the “Agenda 2030” of the United Nations must be taken into consideration. In order to reduce the diffusion problems, “Industrie 4.0” should not only focus on production and fabrication but also on depicting new business models, value-added processes, and in connection with it, new resource efficient potentials, qualification-requirements and design approaches.

There are also potential rebound-effects to be considered. For this, it is necessary to integrate a dynamic of supply, demand, work and consumption. Solutions that contribute effectively to a reduction of rebound-effects, can only be developed through a systems perspective. Reducing exonerated effects for the environment can primarily be expected where, on the one hand, potentials for resource conservation and climate protection exist and, on the other hand, possible rebound-effects are rather small. Against this background, projections, especially in this sector, need to be identified and promoted.

Zusammenfassung

Welchen Beitrag kann Industrie 4.0 zu einer Green Economy leisten?

Mit dieser Leitfrage beschäftigte sich im Rahmen des Projektes Evolution2green eine Zukunftswerkstatt, die am 22.6.2017 in Berlin stattfand. Die Zukunftswerkstatt diente dazu, Ansätze und Potenziale für eine „grüne“ Industrie 4.0 auszuloten und zu bewerten. Ergebnis der Zukunftswerkstatt sind erste Elemente einer Roadmap mit Fragen, Herausforderungen und Themen, die sich an einschlägige Akteure und politische Programme richtet, und Anstöße für eine Ausrichtung der Digitalisierung in industriellen Prozessen an den Zielen einer Green Economy, also einer grünen Industrie 4.0, geben soll.

Industrie 4.0 ist bisher eine weitgehend technikzentrierte industriepolitische Vision. Mit der Debatte um eine Green Economy gibt es nur gelegentlich Berührungspunkte, beide Entwicklungen sind weitgehend unverbunden und verlaufen nebeneinander.

Eine der Hauptaufgaben ist es daher, die bisher voneinander getrennten Diskussionen zusammen zu führen. Dies verlangt ein Zusammenspiel unterschiedlicher Akteure aus Politik, Wirtschaft, Verbänden, Wissenschaft und zivilgesellschaftlichen Gruppen. Für eine Verbreitung von Industrie 4.0 ist es wichtig, Industrie 4.0 stärker auf konkrete und spürbare Bedarfe und Probleme der Unternehmen, vor allem von KMUs, auszurichten, und zugleich die Nachhaltigkeitsziele der „Agenda 2030“ der Vereinten Nationen zu berücksichtigen. Zum Abbau dieses Diffusionsproblems sollte Industrie 4.0 nicht nur auf Produktion und Fertigung fokussiert werden, sondern auch neue Geschäftsmodelle, Wertschöpfungsprozesse und damit zuhängende Ressourceneffizienzpotenziale und Qualifizierungsanforderungen sowie Gestaltungsansätze aufzeigen.

Dabei sind auch potenzielle Rebound-Effekte zu berücksichtigen. Hierzu ist notwendig, sie in eine Dynamik von Angebot, Nachfrage, Arbeit und Konsum einzuordnen. Lösungen, die tatsächlich einen Beitrag zur Verringerung von Rebound-Effekten leisten, können nur aus der Systemperspektive heraus entwickelt werden. Umweltentlastungseffekte sind vor allem dort zu erwarten, wo einerseits Potenziale zur Ressourcenschonung und zum Klimaschutz besonders groß und andererseits mögliche Rebound-Effekte relativ klein ausfallen. Vor diesem Hintergrund sind Ansätze insbesondere in diesen Bereichen zu identifizieren und voranzutreiben.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
1 Einleitung	6
2 Industrie 4.0	8
2.1 Was ist das qualitativ Neue?	8
2.2 Industrielle Revolution oder pfadabhängige Weiterentwicklung?	9
3 Forschungs- und Handlungsbedarf für eine Grüne Industrie 4.0	11
3.1 Mittelstandstauglichkeit: Ressourceneffizienz in der Fertigung	11
3.2 Verknüpfung mit Smart Energy: Emissionsneutrale und energieautarke Fabriken	13
3.3 Neukonfiguration von Wertschöpfungsnetzwerken: dezentrale Produktion	14
3.4 Smart Services: Neue Geschäftsmodelle und Dienstleistungsorientierung	15
3.5 Circular Economy: Re-Manufacturing und automatisierte Demontagefabriken	16
3.6 Arbeit und Qualifikation: zentrale Voraussetzung für eine sozial eingebettete Industrie 4.0	17
3.7 Die Auswirkungen sind ambivalent: Nicht-intendierte Nebenfolgen und Rebound-Effekte	19
3.8 Governance für eine grüne Industrie 4.0	20
4 Fazit: Industrie 4.0 und Green Economy synchronisieren	22
5 Literatur	24
6 Anhang: Zukunftswerkstatt	27

Abkürzungsverzeichnis

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
MES	Manufacturing Execution Systems
Progress	Deutsches Ressourceneffizienzprogramm der Bundesregierung
VDI-ZRE	Verein Deutscher Ingenieure – Zentrum Ressourceneffizienz
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer
WBGU	Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung zu Globalen Umweltveränderungen
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie

1 Einleitung

Industrie 4.0 wurde im Projekt Evolution2green als ein zentrales Transformationsfeld für eine Green Economy identifiziert. Zukünftig sollen, so in der verbreiteten Sichtweise dieses Konzepts, digital vernetzte Systeme eine weitestgehend selbstorganisierte Produktion ermöglichen. Produktions- und Logistikprozesse werden dabei intelligent miteinander verzahnt und so noch effizienter und flexibler gestaltet.

Dies wirft die Frage nach Chancen und Risiken sowie Herausforderungen für eine Green Economy auf. Hierzu sind manche Erwartungen sehr hoch. Nach Einschätzung der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften hat Industrie 4.0 das Potenzial, einen wichtigen Beitrag zur Einsparung von Ressourcen und zur Reduzierung von klimarelevanten Emissionen zu leisten (Acatech 2013). Der Zentralverband der Elektrotechnik und Elektronikindustrie ZVEI erwartet durch Industrie 4.0 eine „Fabrik der Zukunft“ in der durch eine vernetzte, selbstständige Produktion so „effizient und ressourcenschonend wie nie zuvor“ produziert werden kann (ZVEI 2014). Die Global e-Sustainability Initiative, eine Kooperation der informationstechnischen Industrie, schätzt, dass durch die Digitalisierung industrieller Prozesse bis zum Jahr 2030 weltweit Treibhausgase in der Größenordnung von 2,7 Gigatonnen gegenüber einem Business-as-usual-Szenario vermieden werden könnten (GeSI/Accenture 2015). Für Deutschland wird das Einsparpotenzial auf rund 0,1 Gigatonnen beziffert, was etwa 10% der derzeitigen Emissionen ausmachen würde. In jüngster Zeit ist in Deutschland eine Reihe von Initiativen entstanden, die sich um die Erschließung von Umweltentlastungspotenzialen in einzelnen Bereichen bemühen. Dazu zählt beispielsweise die BMBF/VDMA-Initiative „Effizienzfabrik“. In der Fortschreibung des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms der Bundesregierung (Progress II, 2016) wird Industrie 4.0 als ein wichtiger Handlungsansatz angesehen. Eine neue Studie des VDI-ZRE zeigt, dass Unternehmen in verschiedenen Stadien der digitalen Transformation Ressourcen einsparen können, allerdings wird auch deutlich, dass die Chancen von Industrie 4.0 zur Verringerung des Ressourcenverbrauchs eine sehr komplexe Herausforderung darstellt (VDI-ZRE 2017).

Trotz verschiedener Studien, Aktivitäten und Projekte liegen über die spezifischen Potenziale der Industrie 4.0 für ein nachhaltiges Wirtschaften und darüber, wie diese erschlossen werden können, bisher aber kaum fundierte Prognosen und Abschätzungen vor. Vielmehr ist festzustellen, dass die Debatten um Industrie 4.0 einerseits, und um eine Green Economy andererseits weitgehend unverbunden sind und nebeneinander verlaufen. Die Sustainable Development Goals der Agenda 2030 der Vereinten Nationen, die global allen Staaten als Leitorientierung für nachhaltiges Wirtschaften dienen soll, wird in der Digitalisierungsdebatte kaum wahrgenommen. Umgekehrt ist festzustellen, dass die Digitalisierung in der Agenda 2030 kaum vorkommt. Nur gelegentlich bestehen Berührungspunkte zwischen beiden Konzepten (RNE 2015, WBGU 2018).

Welchen Beitrag kann Industrie 4.0 zur Green Economy leisten? Wie kann Industrie 4.0 die Energiewende, Mobilitätswende und Rohstoffwende unterstützen? Wo gibt es Potenziale und wie sind diese einzuschätzen und zu bewerten? Wie kann Industrie 4.0 dazu beitragen, industrielle Verbundstrukturen für effiziente Stoff- und Energieströme zu unterstützen? Welchen Beitrag kann Industrie 4.0 zur Qualitätsverbesserung von Produkten beitragen? Wie kann Industrie 4.0 Logistikprozesse mit Blick auf Ressourcenschonung und Klimaschutz optimieren? Inwiefern kann Industrie dazu beitragen, Produktion in der Nähe des Absatzes zu halten / zu holen und durch dezentrale Produktionskonzepte und kurze Lieferwege die CO₂-Bilanz zu verbessern? Wie kann das transformatorische Potenzial von Industrie 4.0 für eine Green Economy erschlossen werden? Wie und durch welche Akteurskonstellationen lassen sich im Sinne einer Green Economy positive Gestaltungsansätze gezielt nutzen und ausbauen? Welche Hürden können mit welchen Maßnahmen von welchen Akteuren überwunden werden?

Mit diesen Fragen beschäftigte sich im Rahmen des Projektes Evolution2Green eine Zukunftswerkstatt, die am 22.6.2017 in Berlin stattfand. Sie diente dazu, Ansätze und Potenziale

für eine „grüne“ Industrie 4.0 auszuloten und zu bewerten. Darüber hinaus sollten Innovationsfelder definiert und konkretisiert werden, die dieses Ziel unterstützen. Ergebnis der Zukunftswerkstatt sind erste Elemente einer Roadmap für eine grüne Industrie 4.0. Sie zeigt Forschungs- und Handlungsbedarfe auf und identifiziert Herausforderungen und Themen. Notwendig wäre eine umfassende Roadmap auf Basis einer kohärenten nationalen Strategie für die Erschließung der Umweltentlastungspotenziale durch Industrie 4.0, an der sich relevante Akteure aus Wirtschaft, Politik, Wissenschaft sowie Stakeholder beteiligen. Hierfür liefert das Papier Anstöße.

2 Industrie 4.0

Industrie 4.0 wird seit einigen Jahren in Deutschland als eine neue industriepolitische Vision propagiert. Der Begriff geht auf die Forschungsunion und ein gleichnamiges Projekt in der Hightech-Strategie der Bundesregierung zurück. 2011 wurde auf der Hannover Messe diese Vision erstmals in die Öffentlichkeit getragen. Vorangetrieben wird sie insbesondere von der Plattform Industrie 4.0, einem Zusammenschluss der Branchenverbände Bitkom, VDMA und ZVEI unter der Koordination der Bundesministerien für Wirtschaft und Energie (BMWi) sowie Bildung und Forschung (BMBF).

2.1 Was ist das qualitativ Neue?

Wenn von Industrie 4.0 gesprochen wird, dann in der Vorstellung einer zukünftigen industriellen Fertigung, die, sowohl was die Produktion selbst als auch das Umfeld anbetrifft, als „intelligent“ und stark „vernetzt“ beschrieben wird. „Bauteile sollen eigenständig mit der Produktionsanlage kommunizieren und bei Bedarf selbst eine Reparatur veranlassen oder Material nachbestellen - wenn sich Menschen, Maschinen und industrielle Prozesse intelligent vernetzen“ (BMWi 2017). Dadurch verschmilzt die physikalische mit der virtuellen Welt. Die klassische, zentral gesteuerte Produktionshierarchie wird durch dezentrale Selbstorganisation der Produkte abgelöst. Über das Internet der Dinge und Dienste entstehen intelligente Lösungen, die mithilfe von Sensoren und Aktoren Prozesse der physikalischen Welt erfassen, sie mit der virtuellen Softwarewelt verbinden und in Interaktion mit Menschen interpretieren, überwachen und steuern.

Obwohl die Verschmelzung von Produktions- und Informationstechnologien bereits seit mehreren Jahrzehnten im Gange ist, besteht der qualitative Sprung in der vollständigen Integration bestehender Insellösungen in offene Cyber-Physikalische-Systeme (CPS), die nicht nur die fabrikinternen Herstellungsprozesse koordinieren, sondern ebenfalls die Einbindung der Fabriken in globale Wertschöpfungsnetzwerke strukturieren (Petschow 2014). Dieses Potential bezieht sich „insbesondere auf die Verknüpfung vielfältiger Komponenten verschiedener Hersteller, die auf Basis dieser Vernetzung in der Lage sind, kontextbezogene Aufgaben selbstorganisiert zu übernehmen und autark zu arbeiten. Cyber-Physikalische-Systeme ermöglichen es, Produktionssysteme adaptiv und situativ an jeweilige Produktionsbedarfe anzupassen, kurzfristig zu variieren und Fertigungsprozesse entsprechend flexibel zu gestalten (Petschow 2014, S. 19). Mit Blick darauf sind unterschiedliche Komponenten (ZVEI 2016) und ihr Zusammenspiel relevant:

- Smart Objects, Cyber-Physical-Systems: Die Möglichkeit, kostengünstig physische Objekte (Werkteile, Maschinen, Roboter etc.) mit Rechenleistung, Speicherkapazität, Sensorik und Kommunikationsstellen zu bestücken.
- Internet of Things: Die Möglichkeiten, mit smarten Objekten über weltumspannende digitale Netze zu kommunizieren.
- Cloud Computing: Die Möglichkeit, Daten und Rechenleistung in verteilten Systemen zu speichern und zur Verfügung zu stellen.
- Big Data, Algorithmen: Die Möglichkeit, große Datenmengen zu speichern und zu analysieren.
- Service Oriented Architecture, Internet der Dienste: Die Möglichkeit, verteilte Funktionalität über Dienste aufzurufen.
- Virtual Reality, soziale Netzwerke, Smart Phones, Datenbrillen: Die Möglichkeit, über digitale Kommunikationsstrukturen und -mittel mit dem Menschen zu kommunizieren.
- Künstliche Intelligenz: Die Möglichkeit, künstliche Intelligenz in bestehende Produktionsprozesse mit einzubinden.

Einzelne Komponenten finden bereits Anwendung. Kontextsensitive und kommunikationsfähige Maschinen werden mitunter schon in Fabrikinfrastrukturen integriert. Industrie 4.0 fungiert dabei als integratives Gesamtkonzept für Forschung und Entwicklung. Gleichzeitig liefert es eine Orientierung für darauf ausgerichtete, innovationspolitische Aktivitäten (Petschow 2014, Dörre 2016), die ihren Ausdruck in der High-Tech-Strategie 2020 der Bundesregierung finden. Ziel sind intelligente Fabriken, die die steigende Komplexität durch Individualisierung von Produkten und schnelleren Produktzyklen, verkürzten Lieferzeiten beherrschen sollen, weniger störanfällig sind und die Effizienz der Produktion erhöhen.

Da Industrie 4.0 im Wesentlichen als innovationspolitisches Leitbild dient, teilweise auch als Zukunftsszenario eingesetzt wird, wie die Produktion zukünftig aussehen soll, wird der Begriff teilweise sehr anwendungsspezifisch, teilweise sehr pauschalisiert verwendet. Praktisch steht der Begriff für viele Phänomene: digitale Transformation der Produktion, Cyber-Physical-Systems oder Smart Factory (Kopp 2016). „Infolgedessen changiert der Begriff zwischen der Bezeichnung einer real sich beschleunigenden Digitalisierung der Produktionsarbeit und der Vision einer sehr elaborierten Form technologischer internetbasierter Automatisierung. Je nachdem, was mit Industrie 4.0 gemeint ist, befassen sich sehr viele oder erst sehr wenige Betriebe mit dem Thema“ (Kopp 2016). „Der Begriff Industrie 4.0 ergibt jedoch nur Sinn, wenn man ihn als eine spezifische Vision der Richtung, in die das Potenzial der Digitalisierung von Produktionsarbeit gelenkt werden soll“, ansieht (Kopp 2016, S. 7).

Definitionen

Industrie 4.0 bezeichnet „die Verbindung der digitalen Welt des Internets mit den konventionellen Prozessen und Diensten der produzierenden Wirtschaft. Es handelt sich dabei um eine horizontale und vertikale Vernetzung entlang der Wertschöpfungskette mit Verlagerung der Steuerung von oben nach unten“ (BMW 2015). In einem weiteren Sinne handelt es um ein innovationspolitisches Konzept, Leitbild bzw. Zukunftsszenario, das eine digital vernetzte Produktion beschreibt.

Digitale Transformation bezeichnet einen technologiegetriebenen sozioökonomischen Wandel.

Cyber-Physical-Systems bezeichnen den Verbund eingebetteter Komponenten, die über eine Dateninfrastruktur, wie z. B. das Internet, kommunizieren. In Cyber-Physical-Systems werden Objekte durch Programmierbarkeit, Speichervermögen, Sensorik und Kommunikationsfähigkeiten intelligent. Sie können dadurch direkt oder über das Internet durch sogenannte Machine-to-Machine-Kommunikation eigenständig Informationen austauschen, Aktionen auslösen und sich wechselseitig steuern.

Smart Factory: Smart Factory umfasst die Vernetzung von autonomen, sich situativ selbst steuernden, selbst konfigurierenden, wissensbasierten, sensorgestützten und räumlich verteilten Produktionsressourcen (Produktionsmaschinen, Robotern, Förder- und Lagersystemen, Betriebsmitteln) einschließlich der Planungs- und Steuerungssysteme.

2.2 Industrielle Revolution oder pfadabhängige Weiterentwicklung?

Populär ist die Vorstellung von Industrie 4.0 als einer „vierten industriellen Revolution“ (Schwab 2016). Demzufolge steht Industrie 4.0 für eine neue Industrielle Revolution nach den Umbrüchen der Mechanisierung (1. Industrielle Revolution), Elektrifizierung und Massenproduktion (2. Industrielle Revolution) sowie der Verbreitung von Elektronik und Informationstechnik zur weiteren Automatisierung der Produktion (3. Industrielle Revolution). Abgesehen davon, dass erstmals eine Revolution ausgerufen wird, bevor sie stattgefunden hat, wirft dies

die Frage auf, ob es sich tatsächlich um eine Revolution handelt oder nur um eine Beschleunigung des Digitalisierungsprozesses (Kopp 2016).

Langfristige Prognosen zu (systemischen) Wirkungen, Reichweite und Geschwindigkeit des Digitalisierungsprozesses sind in weiten Teilen spekulativ. Bis dato ist festzustellen, dass die Praxis von Industrie 4.0 „sich weniger als Revolution, sondern eher als pfadgebundene beschleunigte Evolution der Digitalisierung im Rahmen bestehender Unternehmenskonzepte“ vollzieht (Kopp 2016). So konzentriert sich die Umsetzung bisher stark auf die Großindustrie. Im Mittelstand ist die Resonanz verhalten, möglicherweise ist dies sowohl eine Konsequenz der unzureichenden Kommunikation und Einbeziehung des Mittelstands in bestehende Aktivitäten und Netzwerke, als auch eine Folge der mangelnden Anschlussfähigkeit von Industrie 4.0. „Kleine und mittelständische Betriebe orientieren sich im digitalen Transformationsprozess überwiegend pragmatisch-inkrementell entlang von Alltagsproblemen und Kundenanforderungen“ (Kopp 2016). Zudem erscheint in der Praxis sich Industrie 4.0, was die organisationale Seite anbetrifft, eher an gängige Lean-Production-Konzepte zu orientieren. Es ist „nicht zu erkennen, dass Lean Production durch Industrie 4.0 abgelöst wird. Stattdessen werden avancierte Digitaltechnologien und sog. 4.0 Applikationen in Lean Production integriert“ (Kopp 2016).

Pfadtreue ist auch dahingehend zu konstatieren, dass der Fokus von Industrie 4.0 bisher sehr technologieorientiert ist. Innovationen auf der Ebene von Geschäftsmodellen werden zwar gewollt, und unter dem Titel Smart Services und Autonome Systeme forschungspolitisch gefördert, spielen aber praktisch eine geringe Rolle. Sattelberger (2016) hält die Fixierung auf Industrie 4.0 für eine grundlegende Schwäche der deutschen Forschungs- und Innovationspolitik. Denn im Grunde genommen wird damit nur die Produktion optimiert, die Bedeutung von Plattformen (mit ihren disruptiven Wirkungen) unterschätzt. Die Realwirtschaft drohe zur verlängerten Werkbank der Plattformbetreiber zu werden, nicht umgekehrt, so Sattelberger (2016). Damit verschiebt sich der Fokus von Smart Factory hin zu Anwendungen, Plattformen und neuen Geschäftsmodellen, insbesondere mit Blick auf Energiesysteme (Smart Grid), Logistikprozesse (Smart Logistics), Gebäude (Smart Building), Produktdienstleistungen (Product Services) und Kreislaufwirtschaft (Circular Economy).

Schließlich hat das Konzept der Industrie 4.0 ein „Nachhaltigkeitsdefizit“ (Kopp 2016). Es fällt auf, dass Nachhaltigkeit im Kontext von Industrie 4.0 auf den Aspekt der Ressourceneffizienz reduziert wird. Das Spannungsverhältnis zwischen Erhöhung der Ressourceneffizienz und dadurch bedingte Rebound-Effekte wird nicht reflektiert. Kennzeichnend ist die starke Anpassung der Produkte (bis zur Losgröße 1) unter den Bedingungen einer hoch flexibilisierten (Großserien)-Produktion. Insofern setzt das bisherige Verständnis von Industrie 4.0 den bestehenden Wachstumspfad fort, ohne eine begründete Aussicht zu haben, den Ressourcenverbrauch ausreichend vom Wirtschaftswachstum entkoppeln zu können.

3 Forschungs- und Handlungsbedarf für eine Grüne Industrie 4.0

Bislang sind Umweltentlastungen durch die Nutzung von Industrie 4.0 (Techniken und Anwendungen) in der Regel nicht intendierte zufällige Nebeneffekte, da Industrie 4.0 vorrangig zur Optimierung von industriellen Prozessen und Geschäftsabläufen genutzt wird. Der wirtschaftliche und ökologische Bedeutungszuwachs von Industrie 4.0 machen aber eine gezielte Berücksichtigung von Umweltaforderungen im Kontext von Innovationsstrategien und Geschäftsmodellen notwendig. Dies wirft insbesondere die Frage auf, welche Rolle Industrie 4.0 im Kontext der Energie-, Verkehrs- und Rohstoffwende leisten kann, und was von wem anders als bisher getan werden müsste. Zugleich ist festzustellen, dass für eine Realisierung umfassender Nachhaltigkeitsanforderungen auch soziale Innovationen, die Zukunft der Arbeit und potentielle Rebound-Effekte zu berücksichtigen sind (vgl. Fichter et al. 2012; Lange/Santarius 2018). Um Chancen von Industrie 4.0 für eine Green Economy zu nutzen und gleichwohl die Risiken, die durch Industrie 4.0, entstehen können, zu entschärfen, müssen insbesondere acht Herausforderungen angegangen werden.

3.1 Mittelstandstauglichkeit: Ressourceneffizienz in der Fertigung

Herausforderungen und Trends

Unternehmen setzen Industrie-4.0-Technologien vorrangig ein, um wirtschaftliche Kennzahlen zu verbessern. Die Ressourceneffizienz betrachten sie selten in Zusammenhang mit Industrie 4.0. Ressourceneffizienz durch Industrie-4.0-Technologien sind daher eher Nebenfolgen und nicht Teil unternehmerischer Strategien. So stellt das Institut der Deutschen Wirtschaft in einer Studie (Neligan 2017) fest, dass selbst bei großen Unternehmen, wo Digitalisierung eine Rolle spielt, die Vernetzung kaum genutzt wird, um Ressourceneffizienzpotenziale zu erschließen. Gemäß der jüngst veröffentlichten Studie des VDI-ZRE „Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0“ (2017) ist bei kleinen und mittleren Unternehmen die Ressourceneffizienz kein Treiber für Industrie 4.0, auch wenn es diesbezügliche Potenziale gibt. Dies weist auf zwei Herausforderungen hin, erstens erfährt die Ressourceneffizienz, speziell die Materialeffizienz eine geringe Aufmerksamkeit, zweitens ändert Industrie 4.0 daran wenig, weil Industrie 4.0 bisher nur sehr zögerlich vom Großteil der Unternehmen aufgegriffen wird. Dies ist nicht nur auf ein Kommunikationsproblem zurückzuführen, sondern auch eine Folge, dass die Konzepte bis dato vielfach noch nicht „mittelstandstauglich“ (Kopp 2016) sind. Eine strategisch ausgerichtete Verknüpfung beider Felder findet in der Praxis kaum statt.

Die Studie des VDI-ZRE (2017) zeigt außerdem, dass Unternehmen in verschiedenen Stadien der Digitalisierung mit spezifischen Maßnahmen betriebliche Ressourceneinsparungen erzielen können, auch wenn dies nicht immer unbedingt eindeutig im Kontext von Industrie-4.0-Technologien steht. In Einzelfällen existieren beachtliche Potenziale. So kann der Strombedarf durch den Einsatz einer Druckluft-Leckage-App um 35 % verringert werden. Hochgerechnet auf Deutschland ergibt sich gemäß der Studie des VDI-ZRE ein CO₂-Minderungspotenzial von 0,4 bis 1,6 Mio. Tonnen CO₂/a. Potenziale für die Ressourceneffizienz liegen insbesondere in der Datenerfassung und -verknüpfung durch den Einsatz von smarter Sensorik und intelligenten Steuerungskonzepten zur unmittelbaren Überwachung des Energie- und Materialverbrauchs. Durch Modellierung und Simulation lassen sich Prozessregelungen optimieren, Effizienzpotenziale erschließen und der Ressourceneinsatz verbessern. Auf der Ebene zwischen Planungssystemen und Maschinensteuerungen sind „Manufacturing Execution Systems (MES)“ im Einsatz. MES können die Ressourceneffizienz von Produktionsvorgängen optimieren, Produkte und Produktionslinien flexibilisieren (Mehrzweckanlagen, mo-

dule Prozesse) sowie lückenlos die erzielte Produktqualität nachweisen (Traceability, Chargenverfolgung). MES kann daher eine Null-Fehler-Produktion unterstützen. Komponenten mit einem hohen Ausfallrisiko werden präventiv selektiert, Fehlermerkmale in Echtzeit detektiert und online visualisiert werden. Außerdem lassen sich ressourcenrelevante Qualitätsparameter (Fehlerrate etc.) ermitteln und abbilden. Konzepte zur vorbeugenden Wartung helfen die Lagerhaltung von Ersatzteilen zu minimieren, da belastbare Vorhersagen über die Lebensdauer von Komponenten gemacht werden können. Wartungsintervalle können optimiert werden, weil (echte) Betriebszeiten von Komponenten zentral erfasst und ausgewertet werden können. Im Bereich der Prozesssteuerung unterstützt IT einerseits die Prozessauslegung, so dass die geeignetsten Aggregate und Verfahren eingesetzt werden. Andererseits geht es um die Optimierung der Prozessführung. Dabei werden alle Prozessinformationen ganzheitlich im Kontext bewertet und die optimale Strategie zur Erreichung des wirtschaftlichen Ziels. So können durch eine Inline- und Online-Qualitätskontrolle qualitätsrelevante Parameter erfasst, schleichende Qualitätsverschlechterungen proaktiv identifiziert und geeignete Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Schließlich ist die kontinuierliche Erfassung und Überwachung der wesentlichen Material- und Energieverbräuche Stand der Technik. Durch Erfassung relevanter Messwerte in Echtzeit, der Analyse der Prozesse und deren Überwachung durch Alarmierung bei Abweichungen von Zielwerten wird der Energieverbrauch transparent, dokumentiert und Energieeinsparungen möglich.

Für die Hersteller und Anbieter von Industrie-4.0-Lösungen besteht die Aufgabe darin, ein umfassendes digitales Betriebsmanagement zu ermöglichen, das Anforderungen der Ressourceneffizienz integriert (ZVEI 2016). Die heute eingesetzten Systeme des Betriebsmanagements für Produktion (Manufacturing Systems), Lagerhaltung, Wartungsmanagement etc. erfüllen nur Teilaspekte. Soll Industrie 4.0 über bisherige Potenziale hinaus zur Ressourceneffizienz beitragen, werden sich diese Systeme so weiter entwickeln müssen, dass sie ohne den heute noch hohen Programmieraufwand interoperabel und damit mittelstandstauglich für das Betriebsmanagement des jeweiligen Unternehmens zusammengefügt werden können.

Folgende Innovationsthemen wurden im Rahmen der Zukunftswerkstatt identifiziert:

Innovationsthemen

- **Digitale Lernverfahren zur Nachverfolgung und Quantifizierung von Material- und Energieeinsparungen:** Die Datengrundlage zur Identifizierung von Ressourceneinsparpotenzialen in den Unternehmen ist speziell für KMUs vielfach unzureichend. Notwendig ist eine intelligente Datenerfassung, -auswertung und -aufbereitung (z.B. maschinelle Lernverfahren, deep learning), um spezifische Daten zum Ressourcenverbrauch auf betrieblicher Ebene als strategische Planungsbasis (Maßzahlensysteme, Erfolgsindikatoren) zur Verfügung zu stellen. Auf operativer Ebene bedarf es zur Aufdeckung der Verbesserungspotenziale entlang der gesamten Wertschöpfungskette einer schnellen Ermittlung von Fehlerstellen, integrierten Qualitätskontrolle und rückgekoppelter Qualitätsregelkreise.
- **Virtuelle Produktentwicklung:** Die Modell-basierte Entwicklung von Produkten reduziert die Abhängigkeit von Tests an Prototypen und erlaubt Ressourcenverbräuche zu prognostizieren, so dass schon während der Entwicklung als Informationsgrundlage in die Entwicklungs- und Designprozesse zeitnah einfließen können. Die Hauptaufgaben liegen in der Schaffung einer durchgängigen Datenintegration für eine effiziente Prognose der Ressourcenverbräuche und der Entwicklung von Formaten für „digitale Lebenszyklusakten“ entlang der Wertschöpfungsketten. Ein Forschungsthema ist die Generierung eines „digitalen Schattens“, der ein hinreichend genaues Abbild der relevanten Daten in der Produktion, der Entwicklung und angrenzender Bereiche liefert mit dem Zweck, eine echtzeitfähige Informationsbasis für die Produktentwicklung zu schaffen.

- **Effiziente Datennutzung durch Big-Data-Analysen:** Bei der Erfassung und Analyse von Daten bieten sich Unternehmen erhebliche Potenziale zur Optimierung ihrer Prozesse, wie z.B. die Auslastung von Produktionsmaschinen, Nutzung von Gebrauchsdaten, um Produkte für eine ressourceneffizientere Nutzung zu optimieren (Öko-Design), Energie- & Ressourceneffizienz und zuverlässige Planung von Wartungsintervallen. Neue effiziente Instrumente, wie Big-Data-Analysen oder Self-X, müssten mit Blick auf Ressourceneffizienz nutzbar und speziell für mittelständische Unternehmen ausgerichtet werden.
- **Demonstration von Ressourcenschonungs- und Kosteneinspareffekten in der industriellen Fertigung:** Speziell KMUs bedürfen der Unterstützung bei der Identifizierung und Realisierung von Ressourceneffizienzpotenzialen durch Industrie 4.0. Für die Kommunikation bedarf es Demonstratoren, die Ressourceneffizienz in Verbindung mit betriebswirtschaftlichen Vorteilen illustrieren. Dies gilt u. a. für Condition Monitoring, prädiktive Wartung, digitale Objektgedächtnisse, intelligente Steuerungskonzepte (adaptive Anpassung der Prozessparameter an die aktuelle Auslastung der Produktion durch Echtzeitanwendungen, Versetzung von Maschinen in produktionsfreien Zeiten in einen Energiesparmodus etc.) und cloudbasierte Fertigung.

3.2 Verknüpfung mit Smart Energy: Emissionsneutrale und energieautarke Fabriken

Herausforderungen und Trends

Im nationalen Klimaschutzplan 2050, den die Bundesregierung im November 2016 beschlossen hat, ist die Reduktion der deutschen Treibhausgasemissionen um 80 bis 95 % bis 2050 gegenüber dem Jahr 1990 als verbindliche Zielsetzung verankert. Hierbei sind die Lösungsbeiträge in erster Linie in den Bereichen regenerative Energiebereitstellung, Stromspeicher, Wärmedämmung, neue Werk- und Baustoffe und industrielle Produktionsprozesse zu suchen. Der wachsende Anteil erneuerbarer Energien im Stromversorgungssystem erfordert zusätzliche Flexibilitätsoptionen durch Speicher, Lastmanagement und Netzausbau. Eine wichtige Rolle spielt dabei die Industrie. Sie verbraucht mit über 300 Mio. MWh pro Jahr knapp die Hälfte der elektrischen Energie in Deutschland. In der industriellen Fertigung hat Industrie 4.0 das Potenzial, im Rahmen von zukünftigen intelligenten Stromnetzen eine wichtige Rolle einzunehmen. Unternehmen können mit Hilfe eines intelligenten und adaptiven Energiemanagements kostenintensive Spitzenlasten abpuffern und Energieeffizienzpotenziale an den Produktionsstandorten (z.B. verfügbare erneuerbare Energiequellen) direkt nutzbar machen. In Pilotprojekten werden die unterschiedlichen Ansätze von Energiespeicher und Smart Meter über Demand Side Management bis hin zu virtuellen Kraftwerken und Microgrids in Verbundlösungen untersucht und entsprechende Informations-, Kommunikations- und Automatisierungstechnologien entwickelt. An den Projekten beteiligen sich Industriebetriebe, Energieversorger, IT Unternehmen und angewandte Forschungsinstitute.¹ Innerhalb der Projekte werden sowohl technische Ansätze als auch Geschäftsmodelle umgesetzt und analysiert. Dabei herrscht insgesamt eine große Unsicherheit darüber, welche Geschäftsmodelle sich durch-

¹ Ein Beispiel ist das Forschungsprojekt DC-INDUSTRIE. Es zielt darauf ab, die Stromversorgung industrieller Anlagen mit dem Ziel über ein smartes, offenes Gleichstromnetz neu zu gestalten und die industrielle Energieversorgungsarchitektur zu digitalisieren. Durch intelligente Netzsteuerung und integrierte Speicher soll sie flexibel und robust auf schwankende Netzqualität und Energieangebote reagieren. Außerdem können erneuerbare Energien leichter eingebunden und Wandlungsverluste von Wechsel- in Gleichspannung vermieden werden. Energieeinsparungen ergeben sich unter anderem durch die einfachere Nutzung und Pufferung von Bremsenergie, dem sogenannten generatorischen Bremsen, in Gleichstromnetzen. <https://www.zvei.org/presse-medien/pressebereich/energiewende-trifft-industrie-40-forschungsprojekt-dc-industrie-startet/>

setzen werden. Allgemein ist zwar ein großes Interesse der beteiligten Akteure an intelligenten Lösungen zu verzeichnen. Wie und von wem aber die Investitionen aufgebracht werden sollen, um solche Lösungen zu realisieren, ist unsicher.

Innovationsthemen

- **Adaptive Laststeuerung:** Mit einer adaptiven Laststeuerung können Fabriken und Maschinen durch Industrie 4.0 Energie einsparen und besser ausgelastet werden. Ansätze sind insbesondere: Reduzierung von Spitzenlasten, Einbindung in intelligente Stromnetze, Anbindung dezentraler Erzeugungsanlagen (vor allem auf Verteilnetzebene) und Verbraucher (Anlagen, Maschinen, Komponenten) mit eigenen Datenflüssen und -kommunikation sowie Integration von Energiespeichern in der industriellen Fertigung. Hierfür sind professionelle Datenerfassungssysteme zur Erstellung von Produktionsplänen und Verbrauchsprognosen zu entwickeln. Die wichtigen Energieflüsse im Unternehmen müssen dokumentiert und auswertbar sein, dann können intelligente Systeme auf Basis von Industrie 4.0 zur Laststeuerung als Element einer Gesamtoptimierung einen maximalen Beitrag leisten,
- **Nullemissionsgewerbegebiete:** Industrie 4.0 kann ein unternehmensbergreifendes Energiemanagement unterstützen, z.B. hinsichtlich der Lastspitzenregulierung, der Versorgung benachbarter Betriebe mit Überkapazitäten oder auch der Nutzung von Abwärme im Netzwerk. Forschungs- und Entwicklungsbedarf gibt es bei der Entwicklung von kooperativen Formaten für Datenaustausch und Prozessplanung. Neben technologischen Fragen sind auch ökonomische und rechtliche Gesichtspunkte von Kooperationen und Fragen der Datenzugänglichkeit und -sicherheit zu klären.
- **Smart contracts auf Basis der Blockchain-Technologie:** Die Blockchain-Technologie basiert auf einer dezentralen Datenbank, in der eine Kette aus aufeinander folgenden, voneinander abhängigen Transaktionen in Datenblöcken gespeichert wird. Sie wird heute bereits u.a. genutzt, um die PV-Strom-Produktion von Haushalten zu vernetzen. Zukünftig lassen sich in Blockchains „smart contracts“ einprogrammieren, intelligente Verträge, die automatisch Zahlungen leisten. Dies bietet vielfältige Optionen: automatisierte Abrechnungssysteme, Dokumentation des Zustands von Anlagen (Smart Meter, Photovoltaik-Anlagen, Echtheitsnachweise für Strom aus erneuerbaren Energien).

3.3 Neukonfiguration von Wertschöpfungsnetzwerken: dezentrale Produktion

Herausforderungen und Trends

Informationsverarbeitungssysteme haben in der Supply-Chain seit jeher eine hohe Bedeutung. Diese wird mit der weiteren Vernetzung der Informations- und Warenströme noch weiter zunehmen. Beispielhaft hierfür ist die Entwicklung rund um das Internet der Dinge, die davon ausgeht, dass moderne Internetdienstleistungen und Informationssysteme zunehmend selbststeuernde Sendungen und Logistiksysteme ermöglichen werden. Es wird erwartet, dass die Automatisierung der Identifikationssysteme und damit hohe Rationalisierungseffekte in der Identifikation von Waren und Sendungen hohe Effizienzvorteile in der Logistik ermöglichen werden. Die Möglichkeiten (teil-)rationalisierter Supply-Chain-Management-Systeme sollen zukünftig weiter wachsen und immer mehr Verbreitung finden. Mit flexibleren Prozessen, miniaturisiert und modular, soll schneller auf Produktionsverschiebungen reagiert werden können, beispielsweise durch einfache Variation in der Reihenfolge der Operationen. Dies ermöglicht die Entwicklung von unterschiedlichen Supply-Chains für unterschiedliche

Produkte, so dass flexible Reaktionen auf Nachfrageveränderungen möglich sind. Im Ergebnis ermöglicht die Smart Factory die Produktion von maßgeschneiderten Produkten. Jenseits dieser pfadabhängigen Optimierung erlaubt Industrie 4.0 mit der Möglichkeit der dezentralen Produktion in der Nähe der Absatzorte die Neukonfiguration von Wertschöpfungsnetzwerken, so dass die Effekte auf die Logistik deutlich größer sind. Die Produktion kann beispielsweise, wie im Fall von Adidas bei Sportschuhen von China nach Deutschland zurückgeholt werden. Die Speed factory kombiniert das Design und die Herstellung von Sportartikeln in einem automatisierten, dezentralisierten und flexiblen Fertigungsprozess. Additive Verfahren wie der 3D-Druck ermöglichen ebenfalls eine dezentralere Produktion einzelner Teile on demand. Bisher schien es fast immer nur eine Richtung zu geben, nämlich Fertigung von Massenkongsumgütern in jene Regionen, die komparative Kostenvorteile bieten, sei es wegen billiger Arbeitskräfte oder billiger Energie und Rohstoffe. Es handelt sich dabei vor allem um Schwellenländer in Fernost und Süd- und Mittelamerika, insbesondere China ist zum größten Produktionsstandort für Exportgüter in Industrieländern geworden. Denkbar ist auch eine dezentrale Produktion vor Ort im Einzelhandel. Ein integriertes Beispiel hierfür liefert die Adidas Speed Factory. Kunden konfigurieren Schuhe digital online, die dann on demand mit 3D-Druck in Kleinstserie hergestellt werden. Ob die dezentrale Produktion von Einzelstücken on demand gegenüber der bisher dominierenden Großserienproduktion sich als wirtschaftlich tragfähig und technisch ausreichend robust erweist, muss sich noch zeigen (Pfeifer 2015).

Innovationsthemen

- **Integrierte Produktrückverfolgungslösungen** ermöglichen die Rückverfolgung aller Fertigungschargen in der Herstellungskette und erfassen zugehörige Materialbewegungen; Einsparung von Wegen durch Ferndiagnose Das Management der upstream und downstream-Prozesse ist in vielen Bereichen noch ineffizient und zu wenig an Qualitätsparametern ausgerichtet, obwohl Transparenz und Nachvollziehbarkeit in der gesamten Wertschöpfungskette zunehmend gefordert werden.
- **Selbstoptimierende Logistik** hat das Potenzial Leerfahrten zu reduzieren (1/3 der LKW-Fahrten heute sind leer). Hierzu bedarf es Entwicklungen im Bereich von Algorithmen und künstliche Intelligenz auf der Basis von Online-Plattformen für Speditionen und Frachtunternehmen.
- **Dezentrale Produktion:** Konkrete Daten über Entwicklungen und Effekte dezentraler Produktionsstrategien durch die Neukonfiguration von Wertschöpfungsketten im Kontext von Industrie 4.0 sind bis dato kaum verfügbar. Hier besteht in den kommenden Jahren erheblicher Forschungsbedarf. Ob die jeweiligen Strategien zu öko-effizienten oder umweltentlastenden Lösungen führen (können), ist im Einzelfall genau zu prüfen.

3.4 Smart Services: Neue Geschäftsmodelle und Dienstleistungsorientierung

Herausforderungen und Trends

Industrie 4.0 konzentriert sich bisher vor allem auf die Vorstellung einer „Smart factory“. Auch wenn dies der Kern des Konzeptes ist, sollte Industrie 4.0 nicht zu eng als Smart factory verstanden werden. Die Potenziale liegen vielmehr in Verbindungen mit neuen Geschäftsmodellen. Hier liegt die eigentliche Herausforderung für Unternehmen. Zwar scheint das Potenzial für smarte Produkte und Leistungen, die intelligent und vernetzt sind, enorm. Es werden viele neue Geschäftsmodelle, Serviceprozesse und Produkte entwickelt. Folgt man Schätzungen von Unternehmensberatungen, wie McKinsey liegt die globale Wirtschaftsleistung solcher Produkte und Dienstleistungen im Jahr 2025 bei 11 Prozent (McKinsey 2017). Abgesehen von der großen Unsicherheit solcher Prognosen steht aber fest, dass eine schnelle Ver-

breitung neuer Geschäftsmodelle für smarte Produkte und Leistungen nicht unbedingt zu erwarten ist. Dies gilt insbesondere für die Entwicklung solcher Geschäftsmodelle, die zur Ressourcenschonung und Umweltentlastung beitragen sollen. Die Entwicklung von „grünen“ Smart Services“ setzen nicht nur technologische Basisinnovationen, sondern in vielen Fällen auch neue Leistungs- und Funktionsbündelungen voraus. Dienstleistungen, die auf Optimierung gesamter Produktnutzungssysteme abzielen, spielen aus Nachhaltigkeitsgesichtspunkten eine zentrale Rolle.

Innovationsthemen

- **Produktnutzungssysteme:** Das Leitbild der Green Economy macht eine veränderte Sichtweise auf Innovationsprozesse im Bereich von Industrie von 4.0 notwendig. Die Such- und Entwicklungskorridore sind u.a. auf Dienstleistungen zur Erfüllung von Funktionen (Nutzen statt Besitzen, z.B. Leasing von Chemikalien), vorbeugende Wartung, kostengünstige Reparaturen, ressourcenschonende Produktnutzung und Refurbishing zu richten. Dazu ist das Product Lifecycle Management auf eine neue Stufe zu heben, indem die Prozesse des Engineering, der Produktion und der After-Sales-Services bestmöglich verknüpft werden.
- **Kollaborative Entwicklung neuer Geschäftsmodelle und Dienstleistungen:** Für Entwicklung nachhaltiger Zukunftsmärkte spielen die Integration von Kunden und die Zusammenarbeit mit relevanten gesellschaftlichen Stakeholdern eine wichtige Rolle. Gerade in neu entstehenden und jungen Märkten sind offene Innovationsprozesse ein Erfolgsfaktor für die Integration von Nachhaltigkeitsanforderungen. Hierfür müssten Formate für ein „Transformationsdesign“ für Industrie 4.0 entwickelt werden. Als Orte des Experimentierens und des Ausprobierens könnten beispielsweise Fablabs, Open-source-Innovationsplattformen und Netzwerke nutzbar gemacht werden.

3.5 Circular Economy: Re-Manufacturing und automatisierte Demontagefabriken

Herausforderungen und Trends

Für die Verwertung des Abfalls existiert eine umfangreiche Recyclinginfrastruktur, die Sammlung, Transport, Sortierung, Aufbereitung und Verwertung von Abfällen umfasst. Den Sortier- und Trenntechniken kommt beim Recycling von Massenabfällen eine Schlüsselstellung zu, da sie eine schnelle und effiziente Trennung der einzelnen Abfallfraktionen ermöglichen. Optische Erkennung (Farbdetektion, Farbanalyse), Nahinfrarotdetektion, Röntgendetektion sowie Induktionsmessung sind Stand der Technik und werden großmaßstäblich eingesetzt. Im Bereich der Industrierohstoffe ist das Recycling von Metallen weit entwickelt. Das betrifft alle gängigen Industriemetalle wie Kupfer, Aluminium, Blei, Zinn oder Nickel. Trotz umfangreicher Recyclingaktivitäten gehen die Siedlungsabfallmengen dennoch nicht zurück, sie sind in den letzten Jahren sogar gestiegen. Außerdem ist die Steigerung der Qualität der Recyclingstoffe eine Aufgabe. Notwendig ist eine höhere Produktreinheit und Ausbeute. Eine Herausforderung stellt auch das Recycling von Technologiemetallen dar. Zwar lassen sich Edelmetalle wie Gold oder Silber heute mit modernen metallurgischen Verfahren in der Regel hohe Rückgewinnungsraten erzielen. Trotzdem sind die Recyclingraten vieler Technologiemetalle bis dato niedrig.

Die Automatisierung der Sortier- und Demontageprozesse hat sich bislang noch nicht durchgesetzt. Gründe hierfür sind insbesondere hohe Kosten und die damit verbundene lange Amortisierungszeit, niedrige Stückzahlen, schnelle Produktwechsel und Weiterentwicklungen sowie Volumenschwankungen. Für die Rückgewinnung von Tantal, Lithium, Seltenen Erden, Gallium oder Germanium existieren noch keine kommerziellen Recyclingverfahren. In neuerer Zeit werden hier zahlreiche Forschungsanstrengungen unternommen und in Pilotanlagen

erprobt. Im Fokus stehen Rohstoffe, die für Zukunftstechnologien verfügbar sein müssen und eine große Hebelwirkung für die Wirtschaft haben (z.B. Lithium für Traktionsbatterien). Intelligente Demontagesysteme können das Recycling von Elektro(nik)altgeräten unterstützen und damit die Rückgewinnung von Technologiemetallen verbessern, wie Versuchsreihen, Tests und Pilotanlagen zeigen („Pre-Shredding“). Auch für den Bereich des Re-Manufacturing ergeben sich neue Potenziale, wenn Produktinformationen für die Wieder- und Weiterverwendung verfügbar gemacht werden können. Optionen wie Re-Commerce von noch funktionsfähigen Produkten können durch eine durchgängige Datenintegration unterstützt werden.

Innovationsthemen

- **Flexible Sortier- und Demontagesysteme:** Eine Voraussetzung für den wirtschaftlichen Erfolg einer Automatisierung ist die hohe Flexibilität von Sortier- und Demontagesystemen bei niedrigen Investitions- und Instandhaltungskosten. Hohe Priorität haben sowohl die Steigerung der Geschwindigkeit der Anlagen, als auch die Erweiterung der Möglichkeiten der Sortierung. Die Herausforderung liegt dabei in der intelligenten und wirtschaftlichen Auswahl und Anordnung der einzelnen Technologien und Teilsysteme, um ein Optimum aus Performance und Kosten der Sortierung zu erreichen. Die Herausforderung besteht darin, die Prozesse zu flexibilisieren, indem sensorgestützte Sortiertechniken zur Qualitätskontrolle und in einem weiteren Schritt auch zur Prozesskontrolle und –steuerung genutzt werden.
- **Smart Disassembly Factory:** Industrie 4.0-Aktivitäten sollten auf die Entwicklung von Demontagefabriken ausgeweitet werden. Es geht dabei um die Vernetzung von autonomen, sich situativ selbst steuernden, selbst konfigurierenden, wissensbasierten, sensorgestützten und räumlich verteilten Demontage- und Aufbereitungsprozessen zur Rückgewinnung von Wertstoffen aus Altprodukten. Forschung und Entwicklung sind insbesondere mit Blick auf einen modularen Aufbau von Demontagezellen, sensorgeführte Demontageroboter und eine Verknüpfung einer Datenbank mit (Multi-)Sensorik, Bildverarbeitung und Robotersteuerung erforderlich. Funktionsfähige Pilot-Demontagesysteme gibt es bereits. Die Aufgabe besteht darin, solche Anlagen im industriellen Maßstab („scale up“) zu fahren.
- **Datenintegration für Re-Manufacturing:** Möglichkeiten der Datenintegration sind für die Wiedernutzung von Altprodukten nutzbar zu machen. Beispielsweise wäre es denkbar, dass die Produkte in ihrer digitalen Repräsentanz, neben den produkt- und produktionstechnischen Merkmalen auch Informationen zur Nutzung, zur Reparatur, zur Demontage und über ihre Inhaltsstoffe bereitstellen. Vor End-of-Life ließe sich abschätzen, welche Lebensdauer sich bei einem Produkt noch realisieren lässt (Restwert, Restnutzungsdauer). Digitale Zwillinge ermöglichen einen übergreifenden Datenaustausch. Optionen, wie die Wiederverwendung noch funktionsfähiger Produkte bzw. Komponenten können hier durch die Entwicklung eines „digitaler Produktgedächtnisses“ unterstützt werden.

3.6 Arbeit und Qualifikation: Zentrale Voraussetzung für eine sozial eingebettete Industrie 4.0

Herausforderungen und Trends

Für die künftige Realisierung von Industrie 4.0 zeichnen sich umfangreiche und tiefgehende Veränderungen insbesondere im Bereich der Arbeitswelt ab. „Industrie 4.0 reiht sich in eine lange Abfolge von ökonomisch induzierten und technologisch umgesetzten Rationalisierungsschritten ein. Technikentwicklung und -einsatz sind dabei in ihrer gesellschaftlichen Prägung immer Gegenstand von sozialen Auseinandersetzungen.“ (Matuschek 2016, S. 1) So wurde

im Kontext des Diskurses über Industrie 4.0 und weiteren ökonomischen, technologischen und soziokulturellen Trends aus arbeitswissenschaftlicher und gewerkschaftlicher Perspektive das Konzept „Arbeit 4.0“ in die Diskussion eingebracht (siehe Kopp 2016). Damit wird versucht, die Komplexität der dynamischen Veränderungen auch jenseits von technologischen und ökonomischen Kalkülen zu verstehen und zu gestalten.

Aus gewerkschaftlicher Sicht wird dazu thematisiert, dass auch Aspekte von Bedeutung seien, die eher sozialen Innovationen zugerechnet werden können, wie z.B. menschenrechtliche Arbeitsgestaltung, Förderung von Qualifizierungs- und Entwicklungschancen, Mitbestimmung, Tarifschutz, Mindestlohn, ökologischer Wandel, erfolgreiche Integration zugewanderter Menschen, Stärkung der Genderperspektive (bspw. Hofmann 2015). Und auch im Arbeitsministerium wird diese ganzheitliche Sichtweise vorgebracht: „Wenn wir über Arbeiten 4.0 sprechen, reden wir nicht nur über die neuen Technikwelten der Industrie 4.0. Wir reden über die Arbeit der Zukunft in ihrer ganzen Breite und Vielfalt. Dabei ist der technologisch ermöglichte Wandel nur ein wichtiger Treiber. Eine stille Umwälzung geht von den Menschen selbst aus: Wir erleben derzeit einen grundlegenden kulturellen Wandel mit neuen Ansprüchen an die Organisation von Arbeit“ (Nahles 2016, S. 6f.).

Eine der wohl zentralen Folgen und Herausforderungen in Bezug auf Industrie 4.0 im Bereich der Arbeitswelt ist quantitativer Art, nämlich die Abschätzung der Entwicklung der Arbeitsplätze bzw. des Arbeitsvolumens, das durch Digitalisierung und andere Ansätze verursacht oder intensiviert werden dürfte. Hier zeigt sich, dass der Digitalisierungsgrad in der deutschen Wirtschaft in den letzten Jahren und in allen 21 untersuchten Branchen deutlich angestiegen ist (Branchenindex DIGITAL, BMWi 2014, S. 14). Aus einer solchen Quantifizierung abzuleiten, welche Effekte dies für die Veränderungen in der Arbeitswelt, der Erwerbsarbeit und der Arbeitsplätze haben wird, ist schwer einzuschätzen (Diefenbacher et al. 2016, S. 349 ff). Hier gehen die Schätzungen weit auseinander, da sie sich meist nur auf mögliche technische-arbeitsorganisatorische „Substituierungspotenziale“ von MitarbeiterInnen durch neue Technologien beziehen können, das hinsichtlich Anforderungsprofil, Qualifikation, Branche etc. sehr unterschiedlich ist (siehe Diefenbacher et al. 2016, S. 351 f.).²

So sind in wissenschaftlichen und öffentlichen Debatten sehr unterschiedliche Einschätzungen festzustellen, die von Arbeitsplatzverlusten von durchschnittlich 47 Prozent in den USA ausgehen (Frey/Osborne) oder etwas differenzierter von 46 Prozent (bei Helferberufen) bis hin zu 18 Prozent (bei Expertenberufen) (Dengler/Matthes 2015) (zitiert in Diefenbacher et al. 2016, S. 351 f.). Worauf aber in Bezug auf derartige Prognosen hingewiesen wird, ist die Einschätzung, dass derartige Potenziale aus verschiedenen Gründen nicht voll ausgeschöpft werden würden, sondern von der jeweiligen Situation und Position in den Unternehmen und Betrieben abhängig, und mithin gestaltbar seien, z.B. hinsichtlich der erwarteten Polarisierung der Arbeitskräfte. „Die entstehende Bifurkation der Arbeitsmuster und die Polarisierung der Arbeitskraft sind nicht das notwendige Resultat des technologischen Fortschritts oder unausweichliche Tendenz wie etwa die Entstehung der postindustriellen Gesellschaft oder der ‘Dienstleistungsökonomie’. Diese Prozesse sind gesellschaftlich determiniert und auf Managementebene geplant im Prozess der kapitalistischen Neustrukturierung. (...) Unter diesen Bedingungen werden Arbeit, Beschäftigung und Berufe transformiert, und selbst die Vorstellung davon, was Arbeit und Arbeitszeit sind, könnte für immer verändert werden“ (Castells 2001, S. 282).

² Hierzu heißt in einer anderen Studie: „Im Automatisierungsszenario übernehmen Menschen verstärkt ausführende Tätigkeiten in von Maschinen gelenkten Umgebungen, womit die Arbeit von Geringqualifizierten entwertet wird. Spezialisierte Fachkräfte und Hochqualifizierte gewinnen an Bedeutung, während allgemein ausgebildete Fachkräfte an Bedeutung verlieren. Im Hybridszenario übernehmen Technologien, vernetzte Objekte und Menschen interaktiv und kooperativ Steuerungs- und Kontrollaufgaben. Im Spezialisierungsszenario verbleibt die Technik als Werkzeug, Facharbeit bleibt Part von hoch qualifizierten SpezialistInnen wie allgemein qualifizierten Fachkräften.“ (Matuschek 2016, S. 3)

Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass die prinzipielle Gestaltbarkeit und die konkrete Gestaltung der Nutzung der technologischen Möglichkeiten von zentraler Bedeutung sein werden. Und hier kann aus bisherigen Erfahrungen von Technikeinsatz und Arbeitsorganisation gelernt werden. „Dort, wo die Digitalisierung voranschreitet, ähnelt die Neustrukturierung der Erwerbsarbeit überwiegend eher dem wettbewerbszentrierten Low-Cost-Szenario als dem einer intelligenten Schwarmorganisation. Umso wichtiger ist es, dass betriebliche Interessenvertretungen und Gewerkschaften ihren Gestaltungsanspruch artikulieren. Dabei benötigen sie die Hilfe staatlicher Politik – etwa bei der Durchsetzung und Erweiterung von Mitbestimmungsrechten“ (Dörre 2016, S. 11). Daher lassen sich Herausforderungen und Aufgaben für die Gestaltung der Innovationsprozesse einer sozial eingebetteten Industrie 4.0 hin zu einer Green Economy ableiten.

Innovationsthemen

- **Qualifikation, Aus- und Weiterbildung von Fachkräften:** Sie sind eine Grundbedingung zur angemessenen und zügigen Implementierung von IKT-Lösungen in der industriellen Praxis. Gerade in klein- und mittelständischen Unternehmen bildet die hohe Technikdynamik oftmals eine Hürde bei der Ausschöpfung eines IKT-basierten Effizienzpotenzials. Auch hierbei sind gut aufbereitete Beispiele einschließlich einer präzisen Quantifizierung von ökonomischen und ökologischen Effekten eine Voraussetzung. Es kommt im industriellen Umfeld auf einen realen Nutzen (Senkung direkter und indirekter Kosten, Risikominimierung, etc.) und nicht auf Technikfixiertheit an.
- **Partizipative Formen der Arbeits- und Technikgestaltung:** aufgrund der Komplexität der Einführung und Gestaltung von Industrie 4.0 und ähnlichen Entwicklungen in Dienstleistungsbereichen dürften neue Formen der Mitwirkung der MitarbeiterInnen und ihrer Interessenvertretungen zu entwickeln sein. Hierfür gibt es erste Ansätze wie „agiles Management“ oder „Internes Crowdsourcing in Unternehmen“. Dabei böte sich die Chance, die jeweilige Unternehmenskultur zu verbessern, und Aspekte einer Green Economy und nachhaltiger Entwicklung zu stärken. Zudem wäre damit verbunden die Außenbeziehungen von Unternehmen in die lokale oder weitere Gesellschaft und die damit verbundenen Verantwortlichkeiten zu entwickeln und zu fördern (z.B. in Bezug auf Fair Trade, Konfliktrohstoffe, lokale Ökonomie, Kreislaufwirtschaft).
- **Verrechtlichung und Regulierung:** Zahlreiche Aspekte der Arbeitswelt werden durch weitere Digitalisierung und andere technologische und soziale Innovationen geregelt werden müssen. Das beinhaltet quantitative wie qualitative Fragen, wie z.B. Arbeitszeit, Arbeitsplatz/-ort, Qualifikation, Aus- und Weiterbildung, Lohn- und Gehaltsstrukturen. Ob bisherige Formen der Regelsetzung wie bspw. Betriebsvereinbarungen, Tarifrecht und Arbeitsrecht hinreichen, wird zu sehen sein.

3.7 Die Auswirkungen sind ambivalent: Nicht-intendierte Nebenfolgen und Rebound-Effekte

Herausforderungen und Trends

Die meisten Potenzialabschätzungen der Effekte von Industrie 4.0 berücksichtigen Rebound-Effekte nicht. Abschätzungen zur Ressourcenschonung von Industrie 4.0 ohne die Berücksichtigung von Rebound-Effekten sind allerdings unvollständig. Grundsätzlich hat die Abbildung der Umwelteffekte diesen komplexen Wirkungsmechanismen Rechnung zu tragen, um gravierende Fehleinschätzungen zu vermeiden und richtungssichere Schlüsse zu ziehen. Die Effekte von Industrie 4.0 auf die Umwelt sind daher komplex und ambivalent. Es sind umweltentlastende Effekte durch eine Erhöhung der Ressourceneffizienz entlang der Wertschöpfungsketten möglich. Gleichzeitig schafft die Produktion individualisierter Produkte zu Kosten

der Massenproduktion neue Konsumoptionen, was Rebound-Effekte verursachen könnte. Industrie 4.0 hat das Potenzial, die Effizienz von Produktions- und Konsumptionsprozessen im Hinblick auf Kosten, Zeit, Energie, Material und andere Faktoren im ökonomischen System signifikant zu erhöhen.

Es ist mithin sehr schwer zu beurteilen, ob die intendierte Entwicklung hin zu einer Industrie 4.0 mit Blick auf Ressourcenschonung und Umweltentlastung in der Nettobilanz positiv oder negativ ausfallen wird. Während es für die Abschätzung direkter und indirekter Umweltfolgen für einzelne Anwendungen eine gewisse empirische Basis gibt (vgl. VDI-ZRE 2017), stehen Aussagen über langfristige Effekte von Industrie 4.0 noch auf wenig gesichertem Boden. Es werden bis dato nur Einzelaspekte beleuchtet, bisher aber keine umfassenden integrierenden sozial-ökologischen Analysen des Zusammenhangs von Industrie 4.0 und Nachhaltigkeit durchgeführt. Ob Umweltentlastungen durch Industrie 4.0 Anwendungen auf der Mikroebene einzelner Produkte und Prozesse auch volkswirtschaftlich umweltentlastend wirken, wird erst in der makroökonomischen Perspektive sichtbar. Deshalb sind weitergehende Forschungsarbeiten erforderlich, die die Auswirkungen von Industrie 4.0 auf systemischer Ebene für den Ressourcenverbrauch aggregiert ermitteln und mit gesellschaftlichen Folgerungen verknüpfen.

Innovationsthemen

- **Effizienzbedingte Nachfragesteigerung auf unternehmerischer und volkswirtschaftlicher Ebene durch Industrie 4.0:** Da es bislang kaum Untersuchungen über die Höhe der Rebound-Effekte von Industrie 4.0 gibt, sind Forschungsprojekte gefragt, die das Spektrum von Industrie 4.0 Anwendungen untersuchen. In einem weiteren Schritt sind innovative Verfahren zur Abschätzung des Effekts für ganze Volkswirtschaften zu entwickeln, etwa durch belastbare quantitative Modellierungen. Dabei geht es um Wirkungszusammenhänge auf der Mikro-, Meso- und Makroebene und ihrer Verknüpfung zur Erklärung des Rebound-Effekts.
- **Bewertung von Rebound-Effekten im Kontext einer Green Economy:** Entlastungseffekte sind vor allem dort zu erwarten, wo einerseits Potenziale zur Ressourcenschonung und zum Klimaschutz durch Anwendung im Bereich von Industrie 4.0 besonders groß und andererseits mögliche Rebound-Effekte relativ klein ausfallen. Vor diesem Hintergrund sind Ansätze insbesondere in diesen Bereichen zu fördern und voranzutreiben.

3.8 Governance für eine grüne Industrie 4.0

Herausforderungen und Trends

Vorangetrieben wird Industrie 4.0 als industriepolitisches Konzept von Vertretern der deutschen Wirtschaft und Politik, insbesondere mit der Plattform Industrie 4.0. Partizipationsangebote gab es erst relativ spät nach dem eigentlichen Agenda-Setting (Kopp 2016). Top-Down wird versucht, die entworfene Vision für die Wirtschaft attraktiv zu machen. Dies mag mit ein Grund für die bisher verhaltene Resonanz der kleinen und mittelständischen Unternehmen sein. Ein weiterer Gesichtspunkt ist die stark technologische Ausrichtung der Vision. Sie konnte bisher in der Praxis nur unzureichend mit den Bedarfen der kleinen und mittelständischen Unternehmen verbunden werden. Vor diesem Hintergrund wurden bundesweit Kompetenzzentren und Agenturen gegründet, die kleine und mittlere Unternehmen bei der Umsetzung von Industrie 4.0 Strategien unterstützen sollen. Die Bundesregierung möchte mit dem Konzept der Industrie 4.0 die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie sichern und Wirtschaftswachstum generieren. Unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten bleibt das Konzept, wie es von den Protagonisten vorangetrieben wird, einseitig auf Ressourceneffizienz reduziert. Rebound-Effekte bleiben unberücksichtigt. Insgesamt bewegt sich die Debatte zu Industrie

4.0 weitgehend spekulativ zwischen Chancen und Risiken. Dabei werden Bedeutung, Potenziale und Nutzen des Konzeptes häufig zu positiv bewertet, Risiken unterschätzt und die Beschäftigung mit alternativen Optionen vernachlässigt (Kopp 2016). Um Industrie 4.0 aus dieser Schiefelage zu bringen, bedarf es einer Governance, die Nachhaltigkeitsaspekte aufwertet und früh in Innovationsprozesse integriert.

Innovationsthemen

- **Forschungsförderung zur Verknüpfung von Industrie 4.0 mit Green Economy:** Die Forschungsförderung der Bundesministerien greift in verschiedenen Programmen Themen im Bereich von Industrie 4.0 und Ressourceneffizienz auf. Mit Blick auf eine Green Economy müssten die Themen miteinander verknüpft und in zukünftige Forschungsprogramme integriert werden. Darüber hinaus sind Schwerpunktprogramme aufzulegen, die besonders bedeutsame Innovationsthemen und -felder adressieren. Aus der Vielzahl möglicher und notwendiger Maßnahmen zur Realisierung einer grünen Industrie 4.0 in Deutschland soll auf solche fokussiert werden, die für das Gesamtfeld von besonderer Bedeutung sind und wichtige Impulse zur Ressourcenschonung auslösen können.
- **Vernetzung der Beratungsangebote zu Industrie 4.0 und Ressourcenschonung speziell für KMUs:** Viele KMUs des verarbeitenden Gewerbes stehen bei der Digitalisierung noch am Anfang, Industrie 4.0 ist daher kaum ein Thema. Hinzukommt, dass auch Ressourceneffizienz vielfach nur einen geringen Stellenwert hat. Angesichts der Ressourceneffizienzpotenziale, die Industrie 4.0 auf unternehmerischer Ebene bietet, sind für KMUs erst noch anschlussfähige Digitalisierungsstrategien zu entwickeln. Auf Ebene des Bundes und der Länder existieren mit den Mittelstandskompetenzzentren zu Industrie 4.0 einerseits und mit dem VDI-ZRE zu Ressourceneffizienz andererseits verschiedene Beratungsangebote (VDI-ZRE 2017). Diese sind miteinander zu vernetzen, um Synergieeffekte bei der Identifikation und Erschließung von Ressourcenschonungspotenzialen im Rahmen von Industrie 4.0 bei kleinen und mittleren Unternehmen zu erzeugen.
- **Verankerung von Green Economy und Nachhaltigkeit als Querschnittsthema der Plattform Industrie 4.0:** Die Plattform Industrie 4.0 ist ein Netzwerk von Wirtschaft, Verbände, Wissenschaft, Gewerkschaften und Politik, um die „digitale Transformation“ in Deutschland zu gestalten. Die Plattform erarbeitet auch Handlungsempfehlungen zur Umsetzung von Industrie 4.0. Ressourceneffizienzpotenziale werden zwar gesehen und hervorgehoben, spielen aber faktisch keine Rolle in der Arbeit der Plattform. Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit sind deshalb erst noch als Querschnittsaufgaben zu verankern. Die ökologische Bedeutung und die damit verbundenen Chancen und Risiken von Industrie 4.0 machen für die Zukunft eine gezielte Berücksichtigung des Leitbildes einer Green Economy im Rahmen der Plattform Industrie 4.0 notwendig.

4 Fazit: Industrie 4.0 und Green Economy synchronisieren

Eine grüne Industrie 4.0 stellt ein umfassendes sozial-ökologisches Transformationsprojekt dar. Die Digitalisierung industrieller Prozesse ist angesichts der hohen Eigendynamik von zentraler Bedeutung für eine Green Economy. Die Realisierung einer grünen Industrie 4.0 und die Erzeugung positiver gesamtgesellschaftlicher Nachhaltigkeitseffekte, sowohl in ökologischer, ökonomischer als auch in sozialer Hinsicht, stellt eine umfangreiche und komplexe politische Herausforderung dar.

Bislang sind drei Punkte klar: Erstens gibt es bisher kaum belastbare Daten über Ressourceneffizienzpotenziale. So eindrucksvoll die ermittelten Potenziale teilweise auch sind, so sollte zum einen die Höhe der Werte und zum anderen die Bedingungen für deren Realisierung kritisch hinterfragt werden. Für viele der Maßnahmen aus dem Bereich Industrie 4.0 existieren bislang ausschließlich Potenzialabschätzungen. D. h., dass für diese Felder keine oder nur wenig belastbare Daten über tatsächliche, aus der Anwendungserfahrung ableitbare Einsparungen vorliegen (Berger 2017; GeSI/Accenture 2015; Fichter et al. 2012; Behrendt/Erdmann 2010). Zweitens führt 4.0 nicht automatisch zu Umweltentlastungen, wie dies bisweilen angenommen bzw. propagiert wird, sondern wirkt sowohl umweltent- als auch -belastend, ohne dass die ökologischen Gesamteffekte per saldo schon absehbar sind (Lange/Santarius 2018). Drittens ist die Vision von Industrie 4.0 bisher mit technikzentrierten und wachstumsorientierten Vorstellungen verbunden (Kapp 2016), Ressourceneffizienz ist eher ein nicht-intendierter Nebeneffekt. Trotzdem ist die industrielle Digitalisierung in dieser Hinsicht nicht deterministisch, sondern in vielen Feldern zukunfts offen und damit gestaltbar.

Die Frage ist, wie und von wem können die Entwicklungen zu Industrie 4.0 und Green Economy in Zukunft synchronisiert werden und zwar so, dass Ressourcenschonungspotenziale nicht nur möglichst maximal erschlossen werden, sondern mögliche ökologische Mehrbelastungen vermieden werden.

Eine der Hauptaufgaben ist es, die bisher voneinander getrennten Diskussionen zusammenzuführen. Dies verlangt ein Zusammenspiel unterschiedlicher Akteure aus Politik, Wirtschaft, Verbänden, Wissenschaft und zivilgesellschaftlichen Gruppen. Eine besondere wichtige Rolle nimmt dabei die Plattform Industrie 4.0 ein. Dort sind Industrie, Politik, Wissenschaft und Gewerkschaften vertreten. Bisher ist die Ausrichtung stark Technologie-fokussiert. Die Plattform Industrie 4.0 bleibt unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten einseitig auf Ressourceneffizienz reduziert und hat damit ein „Nachhaltigkeitsdefizit“. Green Economy und Nachhaltigkeit sind daher erst noch als Querschnittsthema in der Forschungsförderung und auf der Plattform Industrie 4.0 zu verankern.

Für eine Verbreitung von Industrie 4.0 ist es wichtig, Industrie 4.0 stärker auf konkrete und spürbare Bedarfe und Probleme der Unternehmen, vor allem von KMUs, auszurichten. Zum Abbau dieses Diffusionsproblems sollte Industrie 4.0 nicht nur auf Produktion und Fertigung fokussiert werden, sondern unternehmensnah auch neue Geschäftsmodelle, Wertschöpfungsprozesse und damit zuhängende Ressourceneffizienzpotenziale und Qualifizierungsanforderungen aufzeigen. Notwendig ist ein Ausbau der Beratungsangebote speziell für KMUs zur Nutzung von Industrie 4.0 in neuen Geschäftsmodellen. In diese Richtung zielt das „Transfer-Netzwerk Industrie 4.0“, das derzeit unter Federführung von Bundeswirtschafts- und Bundesforschungsministerium vorbereitet wird. Hier sollen die Angebote und Ergebnisse der Akteure gezielt vernetzt, Module und Angebote für KMUs bereitgestellt und der Praxistransfer zur Umsetzung von Industrie-4.0-Projekten unterstützt werden. Dieses Angebot müsste aber noch um Angebote zur Identifikation und Realisierung von Ressourceneffizienzpotenzialen erweitert werden. Dabei geht es auch um konkrete Qualifizierungsprogramme für Beschäftigte sowie die Implementierung in Ausbildungslehrpläne.

Die Start-Up-Szene ist als ein Experimentier- und Innovationsfeld für eine Green Industrie 4.0 zu nutzen. Digitale Lösungen zahlreicher Start-up-Unternehmen zeigen, dass in einigen Marktsegmenten der Green Economy bereits heute digitale Technologien und Geschäftsmodelle erfolgreich sind. Dies gilt vor allem für den Bereich der Energieeffizienz, der Steuerung und der Integration erneuerbarer Energien sowie der Speichertechnologien. Im Bereich der Rohstoffeffizienz und Kreislaufwirtschaft spielt die digitale Transformation bis dato eine nur geringe Rolle.

Um Ressourceneffizienzpotenziale durch Industrie 4.0 zu erschließen, bedürfen unternehmerische Innovationen flankierender Maßnahmen der Politik. Neben Beratungs-, Finanzierungs- und Fördermaßnahmen spielen struktur-, industrie- und umweltpolitische Rahmenbedingungen eine wichtige Rolle. Industrie 4.0 ist diesbezüglich mit Programmen und Konzepten der Energiewende, Mobilitätswende, Kreislaufwirtschaft, Ressourceneffizienz zu verknüpfen. Hier besteht Handlungs- und Abstimmungsbedarf.

Technikzentrierte Effizienzstrategien reichen nicht aus; es bedarf einer Systemperspektive mit dem Ziel, dass potenziellen Rebound-Effekten aktiv entgegenzuwirken ist. Es ist wenig handlungsrelevant, Rebound-Effekte auf einzelne Produkte und Prozesse zu beschränken, vielmehr ist es notwendig, sie in eine Dynamik von Angebot, Nachfrage und Konsum einzuordnen. Lösungen, die tatsächlich einen Beitrag zur Verringerung von Rebound-Effekten leisten, können nur aus der Systemperspektive heraus entwickelt werden. Entlastungseffekte sind vor allem dort zu erwarten, wo einerseits Potenziale zur Ressourcenschonung und zum Klimaschutz besonders groß und andererseits mögliche Rebound-Effekte relativ klein ausfallen. Vor diesem Hintergrund sind Ansätze insbesondere in diesen Bereichen zu identifizieren und voranzutreiben.

5 Literatur

Acatech (2013): Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0, Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0, Berlin

Behrendt, S. & Erdmann, L. (2010). Querschnittstechnologien: Innovations sprünge zur Ressourceneffizienz. Berlin: ZRE VDI.

Behrendt, S. (2010). Integriertes Roadmapping, Nachhaltigkeitsorientierung in Innovationsprozessen des Pervasive Computing. Heidelberg, New York: Springer Verlag.

Behrendt, S., Fichter, K. et. al. (2008). Nachhaltigkeitsinnovationen in der Display-Industrie. Berlin.

Behrendt, S.; Blättel-Mink, B. & Clausen, J. (2011). Wiederverkaufskultur im Internet – Chancen für nachhaltigen Konsum am Beispiel von eBay. Heidelberg: Springer.

Behrendt, S.; Henseling, C.; Fichter, K. & Bierter, W. (2005). Chancenpotenziale für nachhaltige Produktnutzungssysteme im E-Business. E-Business und nachhaltige Produktnutzung durch mobile Multimediasdienste. Werkstattbericht Nr. 71. Herausgegeben vom Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, Berlin.

Behrendt, S.; Pfitzner, R.; Kreibich, R.; Hornschild, K. (1998). Innovationen zur Nachhaltigkeit: Ökologische Aspekte der Informations- und Kommunikationstechniken. Berlin u.a.: Springer.

BMUB (o.J): „Industrie 4.0: Kann smarte Technik Produkte umweltfreundlicher machen? www.umwelt-im-unterricht.de/unterrichtsvorschle/ge/industrie.

BMWi (2017): Den digitalen Wandel gestalten
<https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/industrie-40.html>.

BMWi (Hrsg.) (2014): Monitoring-Report Digitale Wirtschaft 2014 – Innovationstreiber IKT. Berlin
<https://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/monitoring-report-digitale-wirtschaft-2014-langfassung>.

Castells, M. (2001): Das Informationszeitalter I. Der Aufstieg der Netzwerkgesellschaft. Teil 1 der Trilogie ‚Das Informationszeitalter‘, Opladen: Leske und Budrich.

Diefenbacher, H; Foltin, O.; Held, B.; Rodenhäuser, D.; Schweizer, R.; Teichert, V. (2016): Zwischen den Arbeitswelten. Der Übergang in die Postwachstumsgesellschaft. Frankfurt/M.: Fischer.

Dörre, K. (2016): Industrie 4.0 - Neue Prosperität oder Vertiefung gesellschaftlicher Spaltungen? Sechs Thesen zur Diskussion, Working Paper der DFG-KollegforscherInnengruppe Postwachstumsgesellschaften, Nr. 02/2016, Jena 2016
http://www.kolleg-postwachstum.de/sozwmmedia/dokumente/WorkingPaper/WP2_2016+.pdf

Fichter, K.; Beucker, S.; Hintemann, R.; Behrendt, S. (2012): Gutachten zum Thema „Green IT – Nachhaltigkeit“ für die Enquete-Kommission Internet und digitale Gesellschaft des Deutschen Bundestages, Berlin.

Fraunhofer-Gesellschaft : Forschungsbereich Produktion und Dienstleistung – Industrie 4.0
<https://www.fraunhofer.de/de/forschung/forschungsfelder/produktion-dienstleistung/industrie-4-0.html>.

Germanwatch (2017): Pressemitteilung & Weitblick 01/2017 - Schwerpunkt: Digitalisierung und Ressourcenverbrauch
<http://germanwatch.org/de/13628>, <http://germanwatch.org/de/13613>.

- GeSI/Accenture (2015): Smarter 2030, ICT Solutions for 21st Century Challenges, http://smarter2030.gesi.org/downloads/Full_report.pdf.
- Hoffmann, R. (2015): Gestaltungsanforderungen an die Arbeit der Zukunft: Elf Thesen. In: Hoffmann, R.; Bogedan, C. (Hrsg.): Arbeit der Zukunft, Frankfurt: Campus Verlag, S. 11 – 23.
- IÖW (2017): Forschungsprojekt 2016-2021, Digitalisierung und sozial-ökologische Transformation - Rebound Risiken und Suffizienz-Chancen der Digitalisierung von Dienstleistungen, https://www.ioew.de/projekt/digitalisierung_und_sozial_oekologische_transformation/.
- Kalff, Y. (2017): Digitalisierung und Demokratisierung. Betriebliche Mitbestimmung im Spannungsfeld zwischen Individuierung, Kontrolle und Emanzipation. Working Paper der DFG-KollegforscherInnengruppe Postwachstumsgesellschaften, Nr. 6/2017, Jena 2017
http://www.kolleg-postwachstum.de/sozwmmedia/dokumente/WorkingPaper/WP6_17+Kalff_end.pdf.
- Kopp, R. (2016): Industrie 4.0 und soziale Innovation – Fremde oder Freunde?, FGW-Studie, Digitalisierung von Arbeit 02, Düsseldorf.
- Lange, S.; Santarius, T. (2018): Smarte grüne Welt? Digitalisierung zwischen Überwachung, Konsum und Nachhaltigkeit, oekom, München.
- McKinsey (2017): Das digitale Wirtschaftswunder – Wunsch oder Wirklichkeit, https://www.mckinsey.de/files/mgi_das_digitale-wirtschaftswunder.pdf.
- Nahles, Andrea (2016): Vorwort. In: BMAS (Hrsg.): Grünbuch Arbeiten 4.0, Berlin, S. 6-9, https://www.bmas.de/SharedDocs/Downloads/DE/PDF-Publikationen-gruenbucharbeiten-vier-null.pdf;jsessionid=3C419EE602EF91DB115133BD635E6E76?__blob=publication-file&v=2.
- Neligan, A. (2017); Digitale Strategien für mehr Materialeffizienz in der Industrie, Ergebnisse aus dem IW, Zukunftspanel, IW REport 3/2017
https://www.iwkoeln.de/fileadmin/publikationen/2017/325155/IW-Report_3_2017_Digitale_Strategien_Materialeffizienz.pdf.
- Petchow, U.; Ferdinand J.; Dickel, S.; Flämig, H.; Steinfeldt, M.; Worobe, A. (2014): Dezentrale Produktion, 3D-Druck und Nachhaltigkeit, Trajektorien und Potenziale innovativer Wertschöpfungsmuster zwischen Maker-Bewegung und Industrie 4.0, Schriftenreihe des IÖW 206/14, Berlin
https://www.ioew.de/uploads/tx_ukioewdb/IOEW_SR_206_Dezentrale_Produktion_3D-Druck_und_Nachhaltigkeit.pdf.
- Pfeifer, S. (2015): Industrie 4.0 und die Digitalisierung der Produktion – Hype oder Megatrend?, bpb – Bundeszentrale für politische Bildung. Berlin
<http://www.bpb.de/apuz/209955/industrie-4-0-und-die-digitalisierung-der-produktion?p=all>.
- Pilgrim, H.; Groneweg, M.; Reckordt, M. (2017): Ressourcenfluch 4.0, Die sozialen und ökologischen Auswirkungen von Industrie 4.0 auf den Rohstoffsektor, <https://power-shift.de/wp-content/uploads/2017/02/Ressourcenfluch-40-rohstoffe-menschenrechte-und-industrie-40.pdf>.
- RNE (2016): Industrie 4.0 und Nachhaltigkeit: Chancen und Risiken für die Nachhaltige Entwicklung
https://www.nachhaltigkeitsrat.de/wp-content/uploads/migration/documents/20161230_IFOK_Bericht_Industrie_4-0_und_Nachhaltige_Entwicklung.pdf.
- Roland Berger (2016): Die Digitalisierung in der GreenTech-Branche
<https://www.google.com/search?q=Roland+Berger+%282016%29%3A+Die+Digitalisierung+in+der+GreenTech-Branche%2C&ie=utf-8&oe=utf-8&client=firefox-b>

Sattelberger, Th. (2016), Raus aus dem Industriekorsett: Interview mit Thomas Sattelberger, <http://www.digitalistbesser.org/interview-mit-thomas-sattelberger#more-7625>.

Schwab, K. (2016): Die Vierte Industrielle Revolution, München.

Selim Erol (2017): Conference Paper, Where is the Green in Industry 4.0? or How Information Systems can play a role in creating Intelligent and Sustainable Production Systems of the Future, https://www.researchgate.net/publication/318645767_Where_is_the_Green_in_Industry_4_0_or_How_Information_Systems_can_play_a_role_in_creating_Intelligent_and_Sustainable_Production_Systems_of_the_Future.

United Nations Industrial Development Organization (UNIDO/2017): Kurzbericht, Accelerating clean energy through Industry 4.0 - Manufacturing the next revolution - Executive Summary
http://publications.iass-potsdam.de/pubman/item/escidoc:2510896/component/escidoc:2510900/2510896_executive_summary.pdf
<http://publications.iass-potsdam.de/pubman/item/escidoc:2510896/component/escidoc:2510899/2510896.pdf>.

VDI Zentrum Ressourceneffizienz (2017): Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes
https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/Redaktion/Bilder/Newsroom/Studie_Ressourceneffizienz_durch_Industrie_4.0.pdf

IASS (2017-2020): Forschungsprojekt

<http://www.iass-potsdam.de/de/forschung/digitalisierung-und-auswirkungen-auf-die-nachhaltigkeit>.

WEF - World Economic Forum (2017): Harnessing the Fourth Industrial Revolution for Sustainable Emerging Cities (World Economic Forum's System Initiative on Shaping the Future of Environment and Natural Resource Security), Genf
http://www3.weforum.org/docs/WEF_Harnessing_the_4IR_for_Sustainable_Emerging_Cities.pdf.

WGBU (2018): Stellungnahme, Digitalisierung: Worüber wir jetzt reden müssen
http://www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu.de/templates/dateien/veroeffentlichungen/weitere/digitalisierung.pdf.

ZVEI (<https://www.zvei.org/presse-medien/mediathek/industrie-40-wenn-das-werkstueck-die-produktion-steuert/>).

6 Anhang: Zukunftswerkstatt

Zukunftswerkstatt

»Industrie 4.0: Innovationssprünge der Ressourceneffizienz«

22.6.2017, Berlin

Teilnehmerinnen und Teilnehmer

Dr. Grischa Beier (IASS)

Dr. Axel Borchmann (BMUB)

Theresa Gröninger (Deutsche Bahn AG)

Sarah Güsken (Cybernetics Lab, RWTH Aachen)

Gesa Horn (Cybernetics Lab, RWTH Aachen)

Gunther Koschnick (ZVEI)

Dr. Ingo Matuschek (Universität Duisburg-Essen)

Dr. Christof Oberender (VDI-ZRE)

Prof. Dr. Jörg Reiff-Stephan (TH Wildau)

Ron van de Sand (TH Wildau)

Valentin Tappeser (adelphi)

Nicolas Zimmer (Technologiestiftung Berlin)

Dr. Siegfried Behrendt (IZT)

Dr. Edgar Göll (IZT)

Adrian Röben (IZT)

Jakob Zwiers (IZT)