

# Kreislaufwirtschaft durch digitale Transformation

Die Bedeutung der digitalen Transformation für die Kreislaufwirtschaft

Javad Ghofrani, Universität zu Lübeck und Tassilo Söldner, Technische Universität Clausthal

Bei einer Weltbevölkerung von zehn Milliarden Menschen zur Mitte des 21. Jahrhunderts muss mit natürlichen Ressourcen sparsam und nachhaltig umgegangen werden, um Umweltkatastrophen und Kriege zu verhindern. Obwohl traditionelle Konzepte wie Recycling viel zur Problembewältigung beigetragen haben, müssen wir darüber hinaus in Stoffkreisläufen denken und die traditionelle Produktionswirtschaft in eine Kreislaufwirtschaft verwandeln. Hierzu muss eine enge Verzahnung zwischen Produktion und Recycling geschaffen werden, die kaum ohne Digitalisierung vorstellbar ist. In diesem Beitrag sollen ausgehend von der Industrialisierung die Etappen zu mehr Nachhaltigkeit nachgezeichnet werden. Schließlich soll dargelegt werden, dass die Verwirklichung einer Kreislaufwirtschaft mit der Digitalen Transformation eng gekoppelt sein muss.

## Fehlende Nachhaltigkeit der traditionellen Produktion

Mit der breiten Verfügbarkeit von fossiler Kohle Anfang des 19. Jahrhunderts nahm die industrielle Revolution ihren Anfang. Was als technische Revolution begann, hatte zunächst soziale, dann politische und zuletzt militärische Folgen – Technik wurde ab dem 19. Jahrhundert zunehmend zum Motor der Geschichte [1]. Die Auswirkungen technischer Veränderungen und der Industrialisierung waren nicht mehr nur allein auf die menschliche Gesellschaft begrenzt, sondern hatten auch immer spürbarere Folgen auf unsere natürliche Umwelt. Als frühe Beispiele könnten die Smog-Katastrophe in London 1952 mit mehreren tausend Todesopfern, die den Anlass für erste Umweltgesetzgebungen („Clean Air Act 1956“) bildete, oder gut 20 Jahre später auch die Chemiekatastrophe im italienischen Seveso [2] genannt werden. Die Öffentlichkeit gewann durch damals noch lokal begrenzte Umweltkatastrophen ein Bewusstsein dafür, dass die Nutzung natürlicher Ressourcen prinzipiell mit Kosten für die jeweils heutige und zukünftige Generation verbunden ist. Beispiele hierfür sind die Klimaerwärmung und Mikroplastik in den Meeren.

Es wurde klar, dass ein anfangs geringer Aufwand bei der Entsorgung von gasförmigen, flüssigen oder festen Abfallprodukten des industriellen Produktionsprozesses sowie der Entsorgung von Industrieprodukten, wenn sie

das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben, mit später höheren Kosten verbunden ist. Aufgrund der offensichtlich gewordenen Beschränkungen natürlicher Ressourcen erlebte auch die Technik einen Wandel: es genügte nicht mehr, alle Phasen des Produktionsprozesses zu begleiten, es mussten nun auch umweltschonende Lösungen für Abfallprodukte des Produktionsprozesses gefunden werden.

In thermischen Kraftwerken wurden Filter installiert, in der Verfahrenstechnik wurden immer aufwändigere Vorrichtungen eingeführt, um gasförmige, flüssige oder feste Abfallprodukte während der Produktion zu reduzieren, recyceln oder unschädlich zu machen, in den 1970er Jahren wurden in der Bundesrepublik flächendeckend Maßnahmen ergriffen, um (Endprodukt-)Abfall zu vermeiden oder zumindest weiterzuverarbeiten. Erst 2005 trat das Elektro- und Elektronikgerätegesetz in Kraft, das die Entsorgung und Wiederverwendung derselben regeln sollte.

## Kreislaufwirtschaft als Lösung

Trotz eines gestiegenen Recyclinganteils wird heute immer noch ein großer Teil des industriellen Abfalls deponiert, verbrannt oder sogar in Länder der Dritten Welt verschickt, worauf

### Circular Economy through Digital Transformation – The Importance of Digital Transformation for the Circular Economy

With a world population of ten billion people by the middle of the 21st century, natural resources must be used sustainably to prevent environmental disasters and wars. Traditional concepts such as recycling alone are no longer sufficient. Instead, we must think in terms of material cycles and transform the traditional production economy into a circular economy. To achieve this, a close link between production and recycling must be established, which is hardly conceivable without digitalization. This article begins with an overview of steps of industrial development towards more sustainability, finally showing how the digital transformation can facilitate the realization of a circular economy.

#### Keywords:

digital transformation, circular economy, disruptive technologies, sustainability

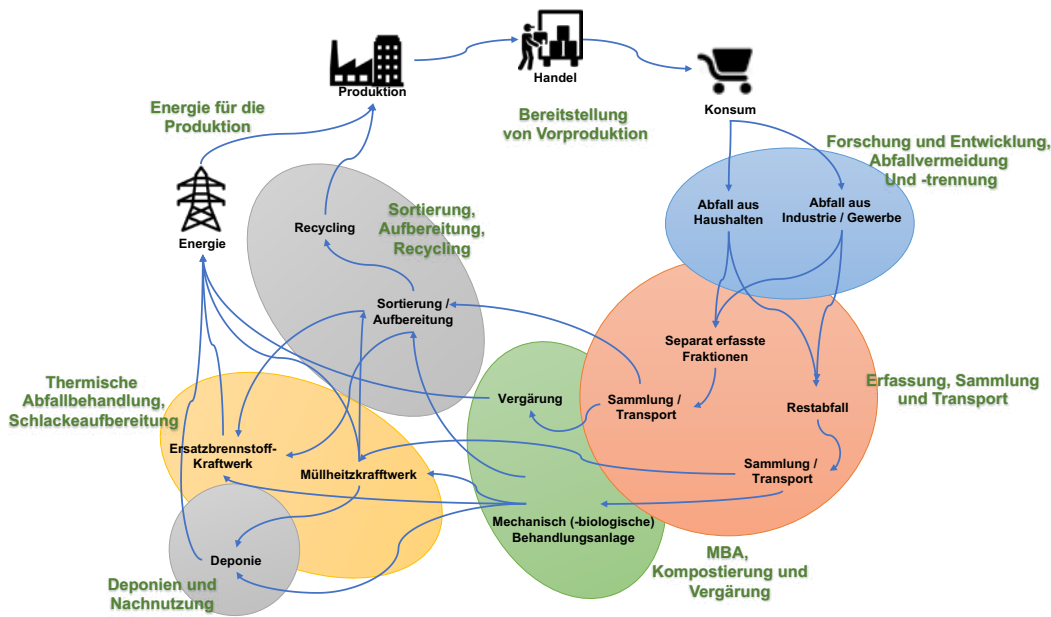


Dr. rer. nat. Javad Ghofrani arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Technische Informatik an der Universität zu Lübeck. Er beschäftigt sich mit Intelligenzen Systemen.



Dipl.-Ing. Tassilo Söldner arbeitet als Softwareentwickler und Cloud Consultant bei der Söldner Consult GmbH. Daneben arbeitet er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Schweißtechnik und Trennende Fertigungsverfahren an der TU Clausthal.

ghofrani@iti.uni-luebeck.de  
www.iti.uni-luebeck.de



**Bild 1: Industrielle Produktion als Kreislaufwirtschaft gedacht [12].**

dieser am Ende meist seinen Weg ins Meer und somit später teilweise in die Nahrungskette nimmt [3].

Anscheinend reichen die herkömmlichen Entsorgungsmethoden global gesehen nicht aus, um der fortschreitenden Umweltzerstörung entgegenzuwirken. In den 1990er Jahren wurde deshalb die Kreislaufwirtschaft als heute gängiges Konzept formuliert, bei dem eingesetzte Materialien in der Produktion möglichst gar nicht mehr deponiert werden sollen [4], sondern an gleicher oder an anderer Stelle wiederverwendet werden sollen. Es soll also ein der Natur nachgeahmter und möglichst geschlossener Kreislauf des verwendeten Produktionsmaterials geschaffen werden, um so die Ressourcenextraktion auf der einen Seite und die Entsorgung bzw. Deponierung auf der anderen Seite zu minimieren.

Das aus der deutschen Forstwirtschaft des 18. Jahrhunderts entlehnte Konzept der Nachhaltigkeit muss also gänzlich auf unsere heutige industrielle Produktionsweise übertragen werden. So fordert der Präsident des BDE Peter Kurth in diesem Sinn bereits für 2031 ein Deponierungsverbot für recycle- und verwertbare Abfälle [5].

Das heißt konkret zunächst, dass zum einen die Lebensdauer der eingesetzten Materialien verlängert, zum anderen im Produktionsprozess Materialien eingesetzt werden sollen, deren negative Auswirkungen auf die Umwelt nach der Entsorgung minimal sind. Für die Industrie bedeutet das, dass sie in zunehmendem Maß für die Produkte nach der Überschreitung der Lebensdauer verantwortlich sein wird, sie muss

mithin als Kreislaufwirtschaft umkonzipiert werden. Zwar gibt es den Begriff der Kreislaufwirtschaft wie erwähnt seit den 90er Jahren, in der aktuellen Literatur gibt es mittlerweile aber mehrere Ausprägungen dieses Konzepts, zu nennen sind hier der Ansatz der Ellen-MacArthur-Foundation [6], das "Cradle-to-Cradle"-Konzept [7], das "Zero-Waste"-Konzept [8], als neuere Konzepte sind noch Biomimetik [9] und „Systems Thinking“ [10] zu erwähnen. Diese Konzepte möchten Recycling und Wiederverwendung in den Lebenszyklus der Produkte integrieren. Sie können u.a.

als Konzeption für kreislaufwirtschaftliche Produktion im Unternehmen gesehen werden. Andererseits geben sie einen Dokumentationsleitfaden für die Bilanzierung und Bewertung sowie für Systemgrenzen mit. Dies veranschaulicht Bild 1, das für Produktionsmaterial neben dem Einsatzort verschiedene Stationen angibt, die nach dem Einsatz durchlaufen werden können.

Allerdings kann aus einem solchen Konzept nicht hervorgehen, wie mit industriellem Altmaterial konkret zu verfahren ist. Auch unterliegt die Behandlung von Altmaterial sich verändernder technischer Gegebenheiten, die sich in den letzten 10 Jahren in Richtung Digitalisierung bewegen, ebenso auch im Bereich Recycling und Ressourcenverwertung. Es ist daher zu erwarten, dass Fortschritte im Recycling-, der Wiederverwendung bzw. -verwertung durch den Einsatz neuer digitaler Technologien überhaupt erst möglich wurden. Dies heißt für die Umsetzung dann konkret eine deutliche Ausweitung der Datengewinnung, sei es schon beim Herstellungsprozess oder beim Einsatz der verschiedenen Industrieprodukte über ihre Lebensdauer und zuletzt bei der Annahme von alten Produkten. Erst mit dieser geschaffenen Datengrundlage können präzisere Aussagen über die Lebensdauer und Wiederverwendung von Produkten bzw. bei Teilkomponenten getroffen werden und bestehende Prozesse und Modelle angepasst werden [11].

Bei dieser Aufgabe muss jedoch eine Vielzahl von technischen Details berücksichtigt werden, deren Komplexität außerdem so hoch ist, dass auch komplexe Werkzeuge (Lösungen) nötig sind. Diese müssen digitaler Natur sein, um den enormen Datenmengen noch gerecht werden

zu können. Waren diese Lösungen in den letzten Jahrzehnten algorithmischer Natur, so kann dieser Ansatz bei zunehmender Komplexität nicht mehr weiterverfolgt werden, da der Arbeitsaufwand zur Erstellung einzelner partikulärer Lösungen zu groß wird. Daher muss auch die Generierung der Lösungen automatisiert werden – genau dies verspricht die seit einem Jahrzehnt ablaufende digitale Transformation in verschiedensten Bereichen, u. a. in der Industrie, dem Gesundheitswesen oder auch bei moderner urbaner Infrastruktur. Die Technologien, die sich im letzten Jahrzehnt als Treiber der digitalen Transformation erwiesen haben, werden hierbei als disruptive Technologien bezeichnet [13].

### Digitale Transformation als Hebel der Kreislaufwirtschaft

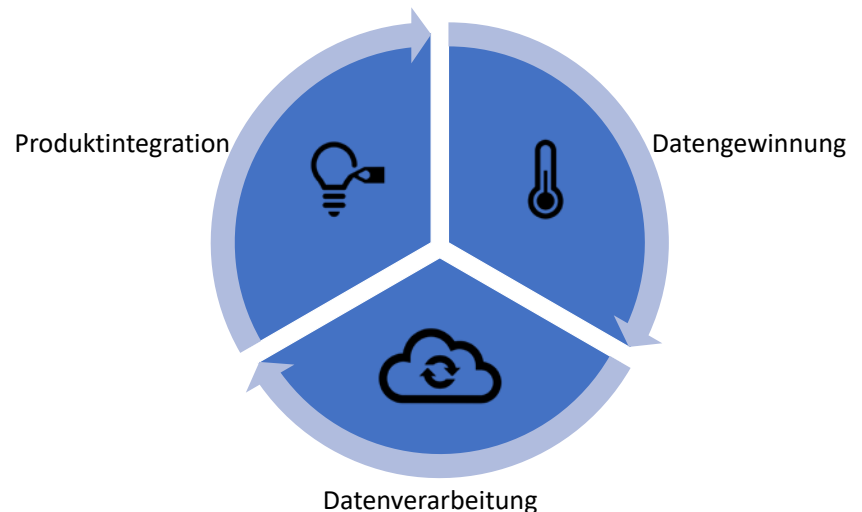
Der Weg von einer „Wegwerfgesellschaft“ zu einer Kreislaufwirtschaft ist nur mit diesen Technologien zu bewältigen – sie sind bei den einzelnen Prozessschritten der Kreislaufwirtschaft nicht mehr wegzudenken, im Einzelnen sind dies:

- 1) Datengewinnung
- 2) Datenverarbeitung
- 3) Integration des aus Daten gewonnenen Wissens in das Produkt

Welche disruptiven Technologien können diesen drei Prozessschritten zugeordnet werden?

Um eine hocheffiziente Kreislaufwirtschaft zu verwirklichen, müssen Informationslücken an verschiedenen Stellen geschlossen werden bzw. durch intelligente Kombination von Informationen neue Einsichten geschaffen werden. Bei der Datengewinnung sind es neue sensorische Möglichkeiten (z. B. Mikro- und Nanosensoren) und darauffolgend das Internet der Dinge. Bei der Verarbeitung der großen Mengen an gewonnenen Daten bei Produktionsprozessen sind hohe Rechenleistungen und große Datenspeicher nötig. Um diese Datenverarbeitung zu ermöglichen, sind insbesondere Cloud, Großdatenanalyse (big data) und maschinelles Lernen zu nennen. Um die Produktionsprozesse und den Einsatz der Produkte über ihre Lebensdauer nachhaltiger zu machen, können Technologien wie digitale Zwillinge, Augmented-Reality-Simulationen und Cyber-Physische Systeme eingesetzt werden, um Prozesse zu analysieren und zu optimieren. Außerdem können dann anhand der systematisch verarbeiteten Daten neue Aussagen über die Produkte und ihre Lebensdauer getroffen werden [14].

Da der Automobilbau ein komplexes industrielles Ökosystem mit einer Vielzahl sehr un-



terschiedlicher Komponenten darstellt, kann diese Branche mittlerweile als Vorreiter bei der Verwirklichung der Kreislaufwirtschaft angesehen werden [15]. Hinzu kommt ein Zusammenspiel disruptiver Technologien, was einen entscheidenden Beitrag zur Digitalisierung innerhalb und zwischen Produktions- und Recyclingsystemen leistet.

Die traditionelle Produktionsweise sieht eine modulare Trennung der Bauteile vor, bei Ersatz bzw. Entsorgung von Einzelteilen, wenn ihre Lebensdauer zu Ende geht. Im Sinne der Kreislaufwirtschaft kann diese Vorgehensweise, die vielfach noch als Ist-Zustand zu betrachten ist, nicht aufrechterhalten werden. Jedoch ist eine Umstellung des Produktionsprozesses mit erheblichen Herausforderungen behaftet. Dies fängt mit der Vielzahl an verwendeten Werkstoffen an, die bei der Verarbeitung sehr großes spezifisches Know-how und deswegen auch die Zusammenarbeit vieler Zulieferfirmen erforderlich machen. Zum anderen ist auch die Reprozessierung von Altkomponenten produktionstechnisch oder verfahrenstechnisch sehr aufwändig. In jedem Fall wird eine Zentralisierung der Daten beim Automobilhersteller erfolgen müssen, um eine genaue Übersicht über die Komponenten und deren vielfach belastungsspezifischen Lebensdauern zu erhalten. Diese Zentralisierung muss sowohl bei den jeweiligen Herstellungsprozessen als auch im eigentlichen Produkteinsatz, d. h. beim Fahren stattfinden. Durch den Fortschritt in der Sensorik ist heute eine Datenerhebung vielfach bei Einzelteilen möglich geworden, das Auto ist so heute bereits zu einem Teil von Cyber-Physischen Systemen geworden, bei dem vielfach bereits im Sinne von Federated Learning [16] lokale Künstliche Intelligenz zur Lebensdauervorhersage verwendet wird [17]. Weiter können KI-gestützte digitale Zwillinge [18] für die Optimierung und Analyse von

**Bild 2: Daten als wichtiger Treiber für Produktverbesserungen.**

#### Literatur

- [1] Hobsbawm, E. J.: Industry and empire. From 1750 to the present day. London 1968.
- [2] Koch, E. R.; Vahrenholt, F.; Koch, E. R.: Seveso ist überall: die tödlichen Risiken der Chemie. Frankfurt am Main 1978.
- [3] Geyer, R.; Jambeck, J. R.; Law, K. L.: Production, use, and fate of all plastics ever made. In: Science advances 3 (2017) 7, S. e1700782.
- [4] Pearce, D. W.; Turner, R. K.: Economics of natural resources and the environment. London 1990.
- [5] Schodrowski, B./BDE: Bericht zur Kreislaufwirtschaft: BDE sieht positive Punkte, moniert aber „verpasste Chance“ für Deponierungsverbot. URL: <https://www.bde.de/presse/bericht-zur-kreislaufwirtschaft-verpasste-chance>, Abrufdatum 06.08.2021.
- [6] MacArthur, E.: Towards the circular economy. In: Journal of Industrial Ecology 2 (2013) S. 23-44.
- [7] McDonough, W.; Braungart, M.: Cradle to cradle: Remaking the way we make things. New York 2010.
- [8] Murray, R.: Zero waste: Greenpeace Environmental Trust. London 2002.
- [9] Vincent, Julian F V et al. "Biomimetics: its practice and theory." Journal of the Royal Society, Interface vol. 3,9 (2006), S. 471-82.
- [10] Kim, D. H.: Introduction to systems thinking, 1. Auflage. Waltham, MA 1999.
- [11] Bag, S.; Wood, L. C.; Mangla, S. K.; Luthra, S.: Procurement 4.0 and its implications on business process performance in a circular economy. In: Resources, Conservation and Recycling (2020) 152, 104502.

- [12] Routenvorschau - Klimaschutz durch Kreislaufwirtschaft e.V.: Themenrouten – die Kreislaufwirtschaft „erlebbar“ und „begehrbar“ machen, URL: <https://www.klima-kreislaufwirtschaft.de/themenroute-der-kreislaufwirtschaft/routenvorschau>, Abrufdatum 06.08.2021.
- [13] Blunck, E.; Werthmann, H.: Industry 4.0–An opportunity to realize sustainable manufacturing and its potential for a circular economy: In DIEM: Dubrovnik International Economic Meeting 3 (2017) 1, S. 644-666.
- [14] Antikainen, M.; Uusitalo, T.; Kivikytö-Reponen, P.: Digitalisation as an enabler of circular economy: Procedia CIRP 73 (2018), S. 45-49.
- [15] Rattmann, D./Audi: „Austausch 2.0“: So funktioniert Kreislaufwirtschaft im Vertrieb, URL: <https://www.audi.com/de/company/sustainability/core-topics/value-creation-and-production/exchange-2-0.html>, Abrufdatum 07.06.2021.
- [16] McMahan, B.; Moore, E.; Ramage, D.; Hampson, S.; y Arcas, B. A.: Communication-efficient learning of deep networks from decentralized data. In: Artificial Intelligence and Statistics (2017). S. 1273-1282.
- [17] Susto, G. A.; Schirru, A.; Pampuri, S.; McLoone, S.; Beghi, A.: Machine learning for predictive maintenance: A multiple classifier approach: IEEE Transactions on Industrial Informatics 11 (2014) 3, S. 812-820.
- [18] Kritzinger, W.; Karner, M.; Traar, G.; Henjes, J.; Sihn, W.: Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification: IFAC-PapersOnLine 51 (2018) 11, S. 1016-1022.
- [19] Raatz, S. /ReziProK: Circular by Design (CbD) - Ressourcenwende über nachhaltiges Produktdesign von Konsumgütern am Fallbeispiel Kühl-/Gefriergerät, URL: <https://innovative-produktkreislaeufe.de/Projekte/Circular+by+Design+%28CbD%29.html>, Abrufdatum 05.08.2021.
- [20] Rudolf, S., Blömeke S., Sharma, P., Lawrenz, S., Scheller, C., Mennenga, M., Schmidt, K., Herrmann, C., Rausch, A., Spengler, T.: Efficient Use–An interdisciplinary framework towards the cascade use of electronics. In: Electronics Goes Green. Berlin 2020.
- [21] Wischniewski, T./Umweltdialog: VW macht Ernst mit digitalem Wandel, URL: <https://www.umweltdialog.de/de/wirtschaft/digitalisierung/2019/VW-macht-Ernst-mit-digitalem-Wandel.php>, Abrufdatum 05.08.2021.
- [22] Trittin-Ulbrich, H., Scherer, A. G., Munro, I., & Whelan, G. (2021). Exploring the dark and unexpected sides of digitalization: Toward a critical agenda. In: Organization, 28(1), S. 8-25.

Herstellungsprozessen verwendet werden. Jetzt schon eingesetzte künstlich intelligente robotische Systeme mit Bilderkennung flexibilisieren die Produktion, ebenso führen sie aber auch zu einer Verbilligung bei Reparatur und Umtauschmaßnahmen.

Neben der Automobilbranche gibt es aber auch andere verschiedene Industrie- und Forschungsprojekte, die sich mit der Kreislaufwirtschaft unter Einsatz disruptiver Technologien befassen. Als ein Beispiel für realistische Projekte mit dieser Ausrichtung kann das Projekt „Circular by Design“ genannt werden [19]. Der Schwerpunkt dieses Projekts liegt auf der Optimierung der Ressourcen- und Energieeffizienz, gekoppelt mit der Entwicklung von Produkten. Durch Simulationen und Datenanalyse sollen mögliche Vorgehensweisen für das Recycling oder die Wiederverwendung von Produktionsteilen und Materialien konzipiert werden. Die Verbindung der Fertigungs- und Verwertungsbetriebe über Netzwerke schafft die Möglichkeit, Produktions-, Produkt- und Verwertungsdaten auszutauschen. Diese Daten können dann für die Entscheidungsfindung und Vorplanung über Recycling- und Produktionsprozesse genutzt werden. Darüber hinaus kann intelligente Bildverarbeitung bei der Datenerfassung und automatischen Analyse der Produkte in den Recyclinghöfen eingesetzt werden, möglichst im Zusammenspiel mit einem intelligenten Robotersystem beim Austausch, sowie bei der Trennung und Reparatur der Produkte.

Das Projekt „EffizientNutzen“ [20] schlägt eine Lösung für die Einwegproduktion von elektronischen Geräten unter Verwendung von Datenerfassung und -analyse vor. Hier soll die Produktion mit recyceltem Material arbeiten und flexibel auf Änderung der Materialzusammensetzung reagieren. Folglich werden Daten aus dem Recycling an die Produktion weitergegeben, um die Produktion kontinuierliche und dynamisch anzupassen, sowie neue Geschäftsmodelle zu ermöglichen und schließlich eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft zu erreichen. Durch Vernetzung soll eine kaskadenartige Wiederverwendung von elektronischen Bauteilen aus dem Lebenszyklus eines Produkts in den Lebenszyklus eines neuen Produkts realisiert werden. So können zum Beispiel die elektronischen Bauteile aus einem recyceltem Auto, wie Displays oder Lautsprecher, für die Reparatur eines Laptops oder eines Soundsystems verwendet werden.

Die hier dargestellten Möglichkeiten der Digitalen Transformation sind für die Umwand-

lung der traditionellen Produktionswirtschaft in eine Kreislaufwirtschaft essenziell – dies fängt damit an, dass man bei diesem Vorhaben stets Rechenschaft über die eingesetzten Ressourcen ablegen muss. In den meisten Fällen müssen nicht alle hier aufgeführten Elemente (oder noch weitere) an einer bestimmten Stelle im Produktionsprozess gleichzeitig auftreten, jedoch wird deren Verkettung und Vernetzung so gut wie immer zu einem höheren Grad der Ressourcenausnutzung beitragen.

Gleichzeitig impliziert der massive Einsatz von digitalen Hilfsmitteln zusätzlichen Verbrauch an elektronischen Komponenten und Strom – ein Overhead, der nur durch präzise Planung einer kreislaufwirtschaftlichen Produktion gedeckt werden kann [21]. Weiter sind zusätzliche Kosten bei den Themen Weiterbildung, ständige Weiterentwicklung, IT-Sicherheit (Cyberattacken) und Datenschutz zu nennen. Darüber hinaus werden sich die Produktionskonzepte und die Geschäftsmodelle verändern, da Kreislaufwirtschaft nur in enger Kooperation zwischen verschiedenen Unternehmen möglich ist – hier dürfte es zu Konsortien kommen, die Lösungen für sich verändernde Wertschöpfungsketten finden und umsetzen müssen [22].

Ressourcen sind endlich

Die heutige industrielle Produktion ist durch verschiedene Umweltprobleme an ihre Grenzen gelangt. Es besteht kein Zweifel, dass durch Recycling und Emissionsschutzverordnungen schon viel erreicht wurde, teilweise wurden aber auch Probleme in andere Länder verlagert. Es braucht daher einen umfassenderen Ansatz – eine Kreislaufwirtschaft. Deren Umsetzung braucht einerseits einen hohen Grad an fachlicher Expertise, andererseits aber eine große Offenheit interdisziplinär neue Lösungen zu finden. Da diese neuen Lösungen von vornherein nur mit einer riesigen Datenmenge, deren Bearbeitung sowie intelligenter Verwendung umsetzbar sind, ist klar, dass verschiedene Technologien, die unter dem Bereich der digitalen Transformation subsumiert werden, nötig sind. Insbesondere wurde klar, dass erst das Zusammenspiel verschiedener Digitaltechnologien die nötige Synergie für eine Kreislaufwirtschaft schafft. Nur mit der entschiedenen Zusammenarbeit und Umsetzung in der heutigen Industrie ist also gewährleistet, dass Technik auch der Motor der Geschichte bleibt.

Schlüsselwörter:

Digitale Transformation, Kreislaufwirtschaft, Disruptive Technologien, Nachhaltigkeit